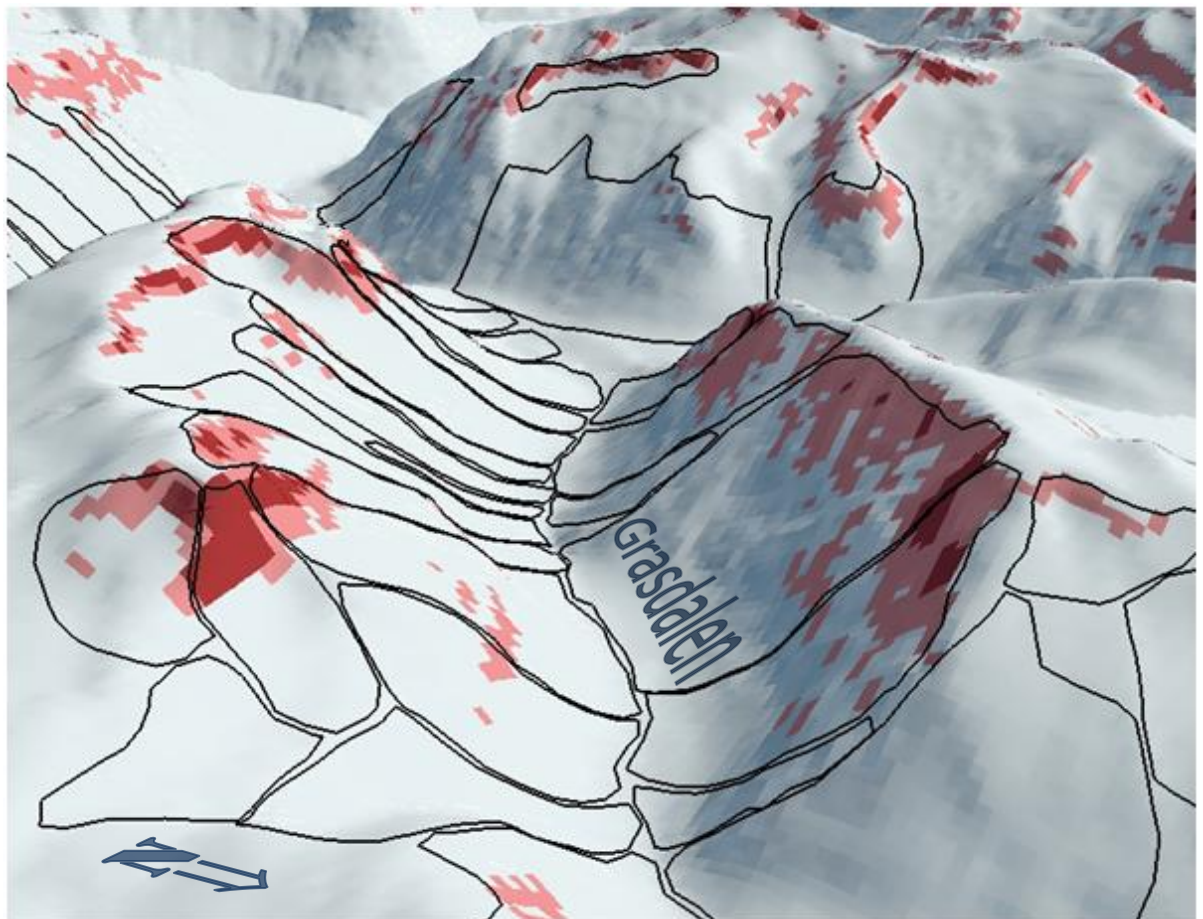


Masteroppgave i geofag

**Bruk av multikriterieanalyser til beregning av
snøstabilitet for snøskredvarsling**

*Utvikling og implementering av snøstabilitetsmodell for
fjellområder i Vest-Norge*

Egil Syre



UNIVERSITETET I OSLO

DET MATEMATISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

Bruk av multikriterieanalyser til beregning av snøstabilitet for snøskredvarsling

*Utvikling og implementering av snøstabilitetsmodell for
fjellområder i Vest-Norge*

Egil Syre



Masteroppgave i geofag
Studieretning: Geomatikk

Institutt for geofag
Det matematisk-naturvitenskapelige fakultet

UNIVERSITETET I OSLO

01.06.2008

© **Egil Syre, 2008**

Veiledere: Bernd Etzelmüller, Universitetet i Oslo (hovedveileder). Kalle Kronholm, Norges geotekniske institutt. Helge Smebye, Norges geotekniske institutt.

Dette eksamensarbeidet er publisert elektronisk i DUO – Digitale Utgivelser ved UiO

<http://www.duo.uio.no>

Det er også katalogisert i BIBSYS (<http://www.bibsys.no/>)

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted, in any form or by any means, without permission.

Forord

Jeg er heldig som har fått anledning til å jobbe med en spennende og lærerik studie som avslutning på mastergraden. Arbeidet viser det jeg mener er essensen i geomatikk: Å bruke kunnskap og verktøy fra flere fagområder for å løse romlige problemer.

Tusen takk til veilederne mine for gode idéer, råd og diskusjoner. Med svært innsiktsfulle råd og forslag har Bernd ledet meg på rett vei de gangene jeg har vært på skogtur. Kalle har introdusert meg til en ny og ukjent verden av snøskred, og gitt meg økt forståelse av problemstillingene gjennom diskusjoner og råd. Hjelpen fra Helge innen GIS og utviklingsmiljø gjorde meg i stand til å implementere løsningen. En stor takk også til International Centre of Geohazards for kontorplass og for å ta meg i mot med åpne armer.

Tusen takk for all støtte fra familie og venner. Stor har spesielt støtten vært fra alle de gode studievennene ved Institutt for geofag, og både faglige diskusjoner, vaffelsteking og «tepausetatling» har vært viktige motivasjonsfaktorer i arbeidet. En spesiell takk til Mika, Ariel, Martin, May-Britt, Mostafa og resten i ZEB-bygningen for mange hyggelige stunder.

En stor takk til Lea og til foreldrene mine for hjelp til «korrekturlesing» og «språk diskusjoner».

Sammendrag

Snøskred er en av de største naturfarene i Norge, og varsling av snøskredfare er viktig for å unngå skader på mennesker, bygninger og infrastruktur. Denne studiens formål var å vise hvordan romlige analyser ved hjelp av multikriterieanalyser kan brukes i varsling av snøskredfare. Multikriterieanalysene ble implementert som en egen applikasjon, hvor de romlige analysene ble utført ved hjelp av GIS-komponenter. Meteorologiske data fra Internett ble kombinert med terrengparametre for å beregne snøens stabilitet ved hjelp av forenklete modeller. Analysene ble kjørt for en studieperiode, og sammenliknet med meteorologiske data og daglige snøskredvarsler.

Studien konkluderte med at multikriterieanalyser ga muligheter til å produsere realistiske prognoser for snøens stabilitet. Resultatene tydet på at prognosene har potensiale til å inngå i et varslingssystem for snøskred, og gi ny informasjon til bruk i vurdering av snøens stabilitet. Multikriterieanalysene produserte data og kart av snøstabiliteten med høyere romlig oppløsning enn dagens snøskredvarsling, og tillot identifisering av skredbaner med lav stabilitet.

Implementasjonen viste også at det er mulig å utnytte meteorologiske data fra Internett i multikriterieanalysene. En framgangsmåte for å håndtere og bearbeide disse dataene ble beskrevet, med fokus på spesielle utfordringer knyttet til utveksling av data. Økt interoperabilitet gjennom utvikling av standarder og teknologi vil trolig kunne løse noen av utfordringene, og derav føre til større nytte av multikriterieanalyser i framtida.

Visse svakheter i datagrunnlaget og modellen ble identifisert, og studien foreslo alternative datakilder og metoder for å overkomme disse. Studiens erfaringer vil kunne være relevante for vurderinger i forbindelse med varsling av andre naturfarer, og videre studier bør utføres for å utforske mulighetene multikriterieanalyser gir, både innen snøskredvarsling og varsling av andre naturfarer.

Innholdsliste

Forord	1
Sammendrag	2
Innholdsliste	3
1. Introduksjon	6
1.1 Bakgrunn	6
1.2 Problemstilling	6
1.3 Studiens formål	7
1.4 Oppgavens struktur	8
2. Teori	9
2.1 Multikriterieanalyser	9
2.2 Datahåndtering	11
2.3 Snøskred	15
2.4 Varsling av snøskred	17
2.5 Varslingssystemer	21
2.6 Numeriske værmodeller	22
3. Feltbeskrivelse	24
4. Metoder og resultater	29
4.1 Valg av snøstabilitetsmodell	29
4.1.1 Datagrunnlag	31
4.2 Implementering av modeller	34
4.2.1 Applikasjon for beslutningsstøtte	38
4.2.2 Ytelse og lagring	40
4.2.3 Presentasjon av resultater	44
4.3 Tilrettelegging av data	47
4.3.1 Modellering av meteorologiske variabler	49
4.3.2 Modellering av temperaturavhengig stabilisering	51
4.3.3 Midling av vindhastighet	53
4.3.4 Snødriftsmodell og vindfeltsmodellering	53
4.3.5 Sensitivitetsanalyse	57
4.4 Validering av multikriterieanalyser	61
4.4.1 Validering av meteorologiske observasjoner	61

4.4.2	Validering av meteorologiske prognoser	64
4.4.3	Studieperiode.....	68
4.4.4	Dag 1 – 3, prognoser produsert 9.2 – 12.2	68
4.4.5	Dag 4 – 5, prognoser produsert 13.2 og 14.2	69
4.4.6	Dag 6 – 8, prognoser produsert 15.2 – 17.2	72
4.4.7	Dag 9, prognoser produsert 18.2	73
4.4.8	Dag 10, prognoser produsert 19.2	75
4.4.9	Sammenlikning med snøskredvarsel fra NGI	76
5.	Diskusjon.....	79
5.1	Bruk av multikriterieanalyser i snøskredvarsling	79
5.1.1	Implementering i et varslingssystem.....	81
5.1.2	Vurdering av analysenes validitet	84
5.1.3	Systemvalg	86
5.1.4	Presentasjon og dokumentasjon	89
5.1.5	Etikk	90
5.2	Forslag til forbedringer i datagrunnlaget	91
5.2.1	Vurdering av datagrunnlag	92
5.2.2	Alternative meteorologiske datakilder	95
5.2.3	Introduksjon av nye variabler	101
5.2.4	Forbedringer av skredbanedataene	103
5.2.5	Ekskludering av bratte helninger.....	107
5.3	Vurdering av delmodeller	109
5.3.1	Snødriftsmodell	109
5.3.2	Ekstrahering av snøstabilitet til skredbaner	112
5.4	Videreutvikling av multikriterieanalyser i varslingssystemer	113
5.4.1	Utvikling innen datakilder.....	115
5.4.2	Interoperabilitet	117
5.4.3	Publisering av resultater	118
5.4.4	Relevans for varsling av andre naturfarer	119
6.	Konklusjon	122
1.	Litteraturliste	123
2.	Figurliste.....	129
3.	Tabeller.....	133

Vedlegg A	Modeller	134
Vedlegg B	Resultater fra snødriftsmodeller	148
Vedlegg C	Snøstabilitetskart	150
Vedlegg D	Meteorologiske observasjoner.....	151
Vedlegg E	Snøskredfarevurdering fra NGL.....	152
Vedlegg F	Oversikt over skredbaner	153
Vedlegg G	Høydeprofiler for utvalgte skredbaner	154
Vedlegg H	Oppsett av datamaskin	155
Vedlegg I	Oppsett av værstasjon.....	156
Vedlegg J	Definisjonsfiler for meteorologiske data.....	157
Vedlegg K	Klassediagram	158
Vedlegg L	Programkode	160
Vedlegg M	Animasjoner	161

1. Introduksjon

1.1 Bakgrunn

Snøskred er en av de største naturfarene i Norge, og forårsaker årlig dødsfall og personskader, og i tillegg skader på bygg og infrastruktur. I perioden 1972 – 2007 omkom 169 personer i snøskred. Av infrastruktur er veinettet spesielt utsatt, og årlig fører snøskred og snøskredfare til rundt 150 veistengninger. Studieområdet Strynefjellet er et særlig utsatt område, og hovedveien gjennom området stenges ofte i lengre perioder om vinteren på grunn av snøskredfare.

Skredvarsling utføres ved å estimere snøens stabilitet, og informasjon om værforhold, snødekke og direkte observasjoner av stabiliteten inngår i disse vurderingene. For å støtte beslutningstakere, kan et varslingssystem for snøskredfare etableres. Norges geotekniske institutt (NGI) har etablert et varslingssystem for Strynefjellet som produserer daglige varsler om skredfare gjennom vinteren.

Tidligere studier har vist at multikriterieanalyser kan brukes i ulike deler av varslingsprosessen. Durand et al. (1999) og Lehning et al. (1999) har demonstrert på hver sin måte hvordan et varslingssystem for snøskredvarsling kan etableres. Seinere har nye studier fulgt opp med å undersøke hvordan modellen kan gjenbrukes for andre områder ved hjelp av lokale tilpasninger. Andre studier har fokusert på bruk av meteorologiske data i varsling. Srinivasan et al. (2005) og Roeger et al. (2003) har diskutert ulike aspekter ved bruk av meteorologiske observasjoner og prognoser i snøskredvarsling.

Studiene tyder derimot også på at multikriterieanalyse blir brukt i begrenset grad, og at analyseresultatene er av liten romlig oppløsning. Kilder for meteorologiske data på Internett blir også i liten grad utnyttet.

1.2 Problemstilling

Multikriterieanalyser er en metode for å analysere romlige problemer. Snøens stabilitet, som er den viktigste faktoren i varslingsproblemet, lar seg estimere ved hjelp av multikriterieanalyser basert

på terreng, værobservasjoner og værprognoser. Metoden blir derimot i liten grad brukt i varsling av snøskred.

Kan multikriterieanalyser produsere prognoser for snøens stabilitet som kan brukes i skredvarsling?

Meteorologiske forhold er sammen med terrenget en av de viktigste faktorene i vurderinga av snøskredfare. En økende mengde meteorologiske data blir gjort tilgjengelig på Internett.

Kan meteorologiske data fra Internett utnyttes i multikriterieanalyser av snøstabiliteten?

Snøskredvarsler blir normalt laget for regioner, og angir ikke eventuelle variasjoner i fare innenfor et område. Høyoppløselige data er tilgjengelige for bruk i multikriterieanalyser, noe som kan gi muligheter for analyser av høyere romlig oppløsning.

Kan multikriterieanalyser estimere snøens stabilitet med høyere romlig oppløsning enn dagens snøskredvarsling?

1.3 Studiens formål

Studiens formål er å undersøke om multikriterieanalyser kan brukes i varsling av snøskredfare. Analysene vil kombinere meteorologiske data fra Internett med terrengparametre fra en digital terrengmodell for å beregne den romlige variasjonen av snøens stabilitet. En enkel modell for beregning av en snøstabilitetsindeks vil bli brukt. Indeksverdien skal brukes til å definere stabiliteten for kjente snøskredbaner i området, og dermed forenkle beslutningsprosessen i et varslingssystem.

Snøstabilitetsindeksen vil estimeres ved hjelp av en formel for snøstabilitet utarbeidet av Föhn (1987). Formelen gjelder for tørre flakskred, som er den dominerende skredtypen i studieområdet (Kronholm et al. 2006). En forenklet versjon av formelen skal benyttes. Resultatene forventes å gi realistiske resultater for snøens stabilitet i forhold til værvarsel og andre skredvarsler. Formelens validitet inngår ikke i studien, i stedet vil vi validere multikriterieanalysene og modellene ved blant annet å sammenlikne resultatene med meteorologiske prognoser og daglige snøskredvarsler.

Meteorologiske prognoser vil benyttes for å beregne prognoser for snøstabiliteten i en periode framover. Samtidig vil meteorologiske observasjoner fra en værstasjon inkluderes. Snødrift

kan gi vesentlig effekt for snødekket i området ved erosjon og akkumulering av snø, og multikriterieanalysene vil ta i bruk en enkel modell for estimering av snødrift. Modellen er beskrevet av Stocker-Mittaz (2001) og er basert på et arbeid av Ryan (1977).

Multikriterieanalysene vil bygges opp som en selvstendig programvareapplikasjon. Applikasjonen vil dele multikriterieanalysene i mindre delmodeller, og hver delmodell vil løses ved hjelp av komponenter fra geografiske informasjonssystemer (GIS). Dataflyt og oppbygging av analysene vil bli vurdert. Spesielt vil vi fokusere på håndtering av meteorologiske data fra Internett. Erfaringene og resultater fra denne studien vil kombineres med andre studier for å belyse studiens problemstillinger.

1.4 Oppgavens struktur

I kapittel 2 beskriver vi det valgte studieområdet og dets egenskaper.

I kapittel 3 går vi gjennom teorien som danner bakgrunnen for studien. Vi ser først på hva multikriterieanalyser er og datahåndtering innen multikriterieanalyser. Basert på tidligere studier gis så en bakgrunn for snøskredene og hvordan snøskredfare kan varsles. Vi ser deretter på hvordan varsler inngår i varslingssystemer, før vi til slutt viser hvordan værmodeller kan produsere prognoser for bruk i snøskredvarslinga.

I kapittel 4 skal vi se på hvilke metoder som ble brukt i studien, og resultatene fra disse. Valget av snøstabilitetsmodell og dets datagrunnlag blir først belyst, deretter en metode for tilrettelegging av dataene for bruk i modellen. Til slutt viser vi en validering av modellen.

Basert på erfaringene og resultatene fra implementeringen, vil vi i kapittel 5 diskutere hvordan multikriterieanalyser kan utnyttes i snøskredvarsling. Vi vil vurdere nærmere datagrunnlaget som er blitt brukt, før vi setter fokuset på de forskjellige delmodellene. Til slutt vil vi ta for oss hvordan studiens metode kan videreutvikles, og relatere dette til varsling av andre naturfarer.

2. Teori

I dette kapitlet vil vi gi den teoretiske bakgrunnen for studien. Vi skal først se på bruken av multikriterieanalyser kombinert med GIS og datahåndteringen dette krever for løse problemer i naturfarer (eng. «geohazards»). Deretter skal vi se på hvordan snøskred oppstår, hvordan de kan varsles, og hvordan de kan inngå i et varslingsystem. Til slutt skal vi se på relevansen av numeriske værmodeller i forbindelse med snøskredvarsling.

2.1 Multikriterieanalyser

Multikriterieanalyser er matematiske verktøy som brukes i beslutningsstøtte til å velge blant et sett med alternativer basert på gitte kriterier (Chakhar og Mousseau 2007). En spesialisering av multikriterieanalyser er romlige multikriterieanalyser. Romlige multikriterieanalyser, heretter kun omtalt som «multikriterieanalyser», er en «systematisk prosedyre for å analysere komplekse romlige [...] problemer» (Karnatak et al. 2007).

Multikriterieanalyser løser problemene ved først å dele problemet opp i mindre deler som hver skal oppfylle de enkelte kriteriene. Hvert delproblem blir løst separat. Resultatene slås sammen til en felles løsning i en prosess som kalles aggregering. Beslutningstakernes preferanser kan inkluderes i aggregeringen ved å vekte kriteriene. Alternativene deles gjerne i to kategorier; diskrete alternativer, det vil si at de er en del av sett med forhåndsdefinerte alternativer, og kontinuerlige alternativer. Resultatene medfører at beslutningstakerne kan velge et eller flere av de alternative løsningene (Chakhar og Mousseau 2007).

Ved splitting av problemet løses hvert enkelt delproblem ved å benytte kartalgebra (Chakhar og Mousseau 2007). Kartalgebra er en metode for å utføre matematiske operasjoner på romlige rasterdata. Resultatene fra hver algebra kan vektes og omregnes til en felles målestokk, for eksempel som verdier mellom 0 og 10, før de aggregeres til en felles løsning.

Kartalgebra er mulig ved hjelp av Geografiske informasjonssystemer (GIS). GIS bidrar med den romlige dimensjonen av multikriterieanalysene gjennom innhenting, håndtering og analyse av romlige data (Chakhar og Martel 2003). I beslutningsstøtteprosessen antas imidlertid GIS å ha begrensede muligheter, blant annet på grunn av manglende interaksjon mellom beslutningstaker og GIS (Gomes og Lins 2002), og mangel på sofistikerte

analyseverktøy (Chakhar og Mousseau 2007). Multikriterieanalyser kan imidlertid integreres med GIS-verktøy, noe som gir muligheten for å både håndtere de romlige dataene og modellere de romlige problemene (Chakhar og Martel 2003). Gomes og Lins (2002) anser at GIS i multikriterieanalyse har flere fordeler:

- GIS gir ekstra struktur i beslutningsprosessen
- GIS gjør det mulig å ta i betraktning flere alternative og introdusere nye tema
- GIS gir muligheter til å diskutere og endre kriteriene
- GIS kan brukes til å utforske og løse konflikter i beslutningskriterier

Kriterier i multikriterieanalyser beskrives ved hjelp av modeller. En modell er en abstraksjon, eller forenklet beskrivelse, av struktur og oppførselen til deler av verden. Modeller videreføres og tilpasses gjerne bestemte behov (Gomes og Lins 2002). Et viktig prinsipp ved utarbeiding av modeller er parsimoni, det vil si forklare eller forutsi virkeligheten med så liten kompleksitet og så få variabler som mulig (Mulligan og Wainwright 2004).

Abstraksjonen kan skje ved å gjengi virkeligheten fysisk i forminsket målestokk. En fysisk abstraksjon er imidlertid dyr og sårbar for feil som følger av at den skaleres i forhold til virkeligheten. Derfor brukes oftest matematiske regler for å beskrive virkeligheten gjennom modeller (Mulligan og Wainwright 2004). Modellene utarbeides ved enten å finne sammenhengen mellom faktiske observasjoner av variabler eller ved hjelp av fysiske lover og antakelser. Mulligan og Wainwright (2004) bruker denne forskjellen til å dele matematiske modeller inn i tre kategorier:

- Empiriske modeller
- Konseptuelle modeller
- Fysikk-baserte modeller

Empiriske modeller søker å finne sammenhengen mellom observerte variabler uten å beskrive prosessene bak. Disse er gode til å forutsi situasjonen, men er avhengige av tilstandene ved observasjonen. Dermed kan de vanskelig overføres til andre situasjoner, tidspunkter eller steder. Fysikk-baserte modeller er baserte på fysiske prinsipper, og gir resultater som ofte samsvarer lite med observasjoner fra virkeligheten (Mulligan og Wainwright 2004). De vil derfor kunne inkludere noen empiriske modeller for å passe bedre til de lokale forholdene, eller for å fylle deler som ikke kan beskrives med fysiske prinsipper. Konseptuelle modeller

inneholder egenskapene til begge ved både å beskrive sammenhengen mellom variablene og samtidig innbefatter oppfatninger av hvordan hele systemet fungerer. Konseptuelle modeller kan bidra til å forklare prosessene bak fenomenene, men ikke i like stor grad som fysiske modeller (Mulligan og Wainwright 2004).

Modeller kan også kategoriseres inn i beskrivende og prediktive modeller. En beskrivende modell vil kun beskrive eksisterende forhold, mens en prediktiv modell gir en antakelse om hvordan eksisterende forhold kan føre til andre fenomener. Modellene benytter variabler som tallfester variasjonen i sted og tid (Mulligan og Wainwright 2004).

2.2 Datahåndtering

I multikriterieanalyser representeres variablene av romlige datasett. Eksempler på slike datasett er temperatur og terrengparametre som høyde og helning. Variablene kan enten være kontinuerlige eller diskrete. En kontinuerlig variabel, også kalt kontinuerlig overflate, har en verdi for hvert eneste punkt innenfor området, mens en diskret variabel opptrer som enkeltobjekt med fastsatt posisjon. I romlige analyser representeres kontinuerlige overflater normalt som et rutenett av diskrete verdier. En slik datamodell kalles ei rasteroverflate, eller bare raster. Diskret data lagres som vektordata, som inneholder både de geografiske koordinatene og attributter. Attributtene lagres i tilhørende tabeller (DeMers 2000).

Rutene i et raster kalles celler, og hver celle har en verdi for variabelen. Størrelsen på cellene bestemmer rutenettets oppløsning. Dataverdiene beskrives numerisk, tekstlig eller som beskrivende tekst. Tekstlige verdier kan overføres direkte til en bestemt numerisk verdi for å brukes i analysene, mens beskrivende tekst må oversettes. Numeriske verdier kan være absolutte, for eksempel temperatur, eller de kan vektes og kobles til en felles skala, for eksempel til verdier mellom 1 og 10. Den sistnevnte metoden kalles reklassifisering.

Verdier mellom cellene i et raster må beregnes. Beregninga skjer matematisk ved hjelp av interpolasjon, en metode for beregning av verdier for punkter som ikke nødvendigvis sammenfaller med målte punkter (Attorre et al. 2007). Metoden antar en romlig korrelasjon, det vil si at for et punkt med ukjent verdi vil verdien være betinget av verdien til nærliggende punkter. Den enkleste formen for interpolasjon er å bruke verdien til nærmeste nabo. Mer avansert interpolasjon beregner endringer i overflaten ved hjelp av lineære eller ikke-lineære

metoder. Vekting (eng. «weighting»), trendoverflater (eng. «trend surfaces») og Kriging er eksempler på ikke-lineære interpolasjonsmetoder (DeMers 2000).

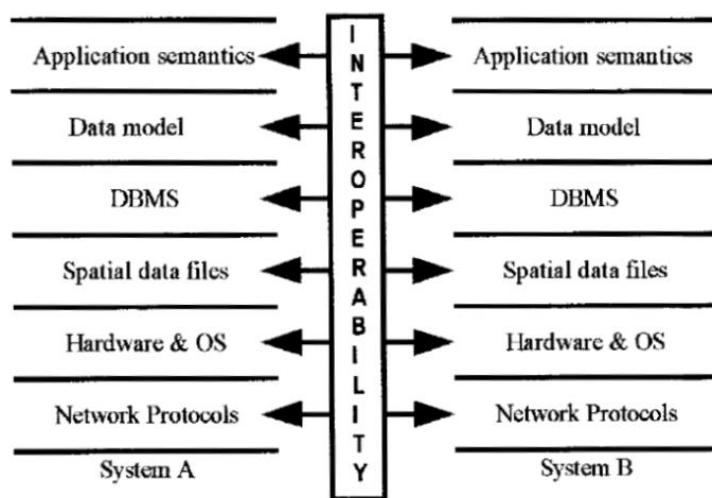
Interpolasjon har blant annet blitt brukt av Yu et al. (2007) for å beregne den lokale variasjonen av nedbør til bruk i jordskredvarsling. Interpolasjonsmetoden «Inverse Distance Weighted» ble brukt for å interpolere akkumulerte verdier fra flere nedbørstasjoner. Samme metode blir også benyttet av Brabec et al. (2001) til å beregne snøskredfare for ukjente posisjoner basert på faregrader ved flere værstasjoner.

Multikriterieanalyser til bruk i forbindelse med naturfarer krever data fra et bredt spekter av fagområder og systemer. Effektiv deling av data og metode er derfor «av avgjørende betydning for veien mot mer allsidige og pålitelige vurderinger i miljømessige beslutningstaking» (Kokkonen et al. 2003). Heterogeniteten i datastrukturer og formater har gjort utveksling av romlige data til en krevende prosess. Flere studier har sett på framgangsmåter for å løse utfordringer knyttet til dette, blant annet utforsket Köhler (2006) en framgangsmåte for håndtering og flyt av data til bruk i håndtering av naturkatastrofer.

Begrepet «interoperabilitet» står ofte sentralt i studiene. Interoperabilitet er evnen systemer har til å utveksle og gjenbruke data (Purves et al. 2005). Tradisjonelt har utveksling av romlige datasett blitt utført ved konvertering til et nøytralt format og deretter oversending av hele datasettet, noe som gir lav interoperabilitet. Etableringa av rammeverk for romlige infrastrukturer, ofte kalt «Spatial data infrastructures» (SDI), har økt interoperabiliteten for både romlige data, metadata, programvare og grensesnitt (Köhler 2006). Interoperabilitet mellom to GIS systemer kan oppnås på flere nivåer (Figur 2-1).

Utnyttelse av klient/tjener-teknologi via Internett er et viktig steg mot interoperabilitet (Voisard og Schweppe 1998). Flere studier, blant annet Chang et al. (2006) og Purves et al. (2005), framhever viktigheten av Open Geospatial Consortium (OGC) sine aktiviteter for å øke interoperabiliteten for romlige data og analyser. OGCs spesifikasjoner gir programutviklere muligheter til å utvikle systemer som kan aksessere og behandle romlige data fra forskjellige datakilder. Fortsatt er det likevel en utfordring å kombinere data fra flere fagmiljøer. Köhlers (2006) studier viste hvordan data fra flere organisasjoner måtte integreres

i et SDI ved hjelp av konvertering til et felles filformat, transformasjon til en felles kartprojeksjon og foredling av rådata.



Figur 2-1 Nivåer for interoperabilitet i GIS (Bishr 1998)

I meteorologi håndteres data forskjellig fra data i GIS. Ofte utveksles værvarseldata i det binære formatet «GRIdded Binary» (GRIB). Formatet er en standard fra World Meteorological Organization for utveksling av værdata, men kan også brukes til andre formål, eksempelvis utveksling av satellittbilder. GRIB-dataene er pakket og lagret som rasterdata (Pokrajac et al. 2003). Selv om fagspesifikke formater ofte brukes for utveksling av meteorologiske data, framholder studien av Kokkonen et al. (2003) behovet for økt interoperabilitet også innen håndtering meteorologiske data.

Utviklinga av eXtensible Markup Language (XML) har gitt nye muligheter for å utveksle strukturerte data over Internett. I studien av Kokkonen et al. (2003) utnyttet standarden til å øke interoperabiliteten for meteorologiske data i GIS-applikasjoner. Som Hypertext Markup Language (HTML) er XML basert på ISO-standarden Standardised Markup Language, SGML. HTML brukes ofte for oppbygging av internettsider, er løst strukturert og beskriver både innhold og presentasjon i samme fil. XML er derimot velstrukturert og egner seg bedre for overføring av strukturerte data (Kokkonen et al. 2003). XML beskrives derfor som et «universelt rammeverk og sett av verktøy for utveksling av data og metadata mellom applikasjoner» (Antoniou og Harmelen 2004). Innholdet deles inn i elementer ved hjelp av markeringer, eller «tags». Dette gjør datamaskiner i stand til å lese og behandle dataene i XML.

Definisjonen av strukturen i XML holdes separat fra dataene ved hjelp av skjemaspråkene DTD eller XML Schema. Disse språkene kan også brukes til å validere XML-filene. Det finnes ikke en universell standard for de elementene eller attributtene som brukes i XML. I stedet utvikles ulike XML-standarder for de ulike miljøene og fagområdene. Flere metoder eksisterer for konvertering av XML-data mellom de ulike standardene. I eXtensible Stylesheet Language Transformations (XSLT) utføres dette ved å definere regler for konverteringa (Antoniou og Harmelen 2004).

Selv om XML gir rammeverket og verktøy for utveksling av data, definerer XML-filer ikke dataens semantikk. XML tillater dermed applikasjonene å tolke dataene ulikt. Det eksisterer derimot standarder som ivaretar felles forståelse av dataene. Corcoles et al. (2004) foreslår en framgangsmåte for å sikre semantisk interoperabilitet for romlige data ved å bruke Resource Description Framework (RDF) og Geography Markup Language (GML). RDF er en domeneuavhengig datamodell som er bygget opp ved hjelp av XML (Antoniou og Harmelen 2004). GML baserer seg både på XML og RDF for lagring av romlige data, og brukes i økende grad innen GIS for datautveksling (Lake 2004).

De seinere årene har publisering av data ved hjelp av webtjenester blitt stadig mer populært (Lake 2004). En webtjeneste er en «applikasjon som aksepterer og prosesserer forespørsler fra andre applikasjoner over et nettverk» (Lake 2004). Webtjenester bruker standard internetteknologi som for eksempel Hypertext Transfer Protocol, «http», og forespørsler sendes oftest som XML.

En rekke standarder for webtjenester er tilpasset geografisk informasjon, flere av dem utviklet av OGC. Web map server (WMS) kan brukes for å levere rasterkart over Internett. Siden tjenesten returnerer ferdigsymboliserte kart, har andre systemer vansker med å utnytte resultatene. Derimot leverer Web coverage server (WCS) rasterdata i sin originale form (Vatsavai et al. 2006). Vatsavai et al. (2006) har vist hvordan standarden kan implementeres for å laste ned rå satellittdata over Internett. For vektordata har OGC utviklet standarden Web Feature Service (WFS), som returnerer data på GML-format (Lake 2004).

XML danner også strukturen for RSS, et format for publisering av nyhetsvarsler til abonnenter. Abonnementet kan skje via flere typer programmer, blant annet e-postklienter og nettlesere (Rzepa et al. 2006). RSS-feeds kan inkludere geografisk informasjon gjennom utvidelsen GeoRSS, noe Tok et al. (2007) demonstrerte ved å utforske hvordan informasjon fra U.S. Geological Survey i form av GeoRSS kan utnyttes i romlige modeller.

2.3 Snøskred

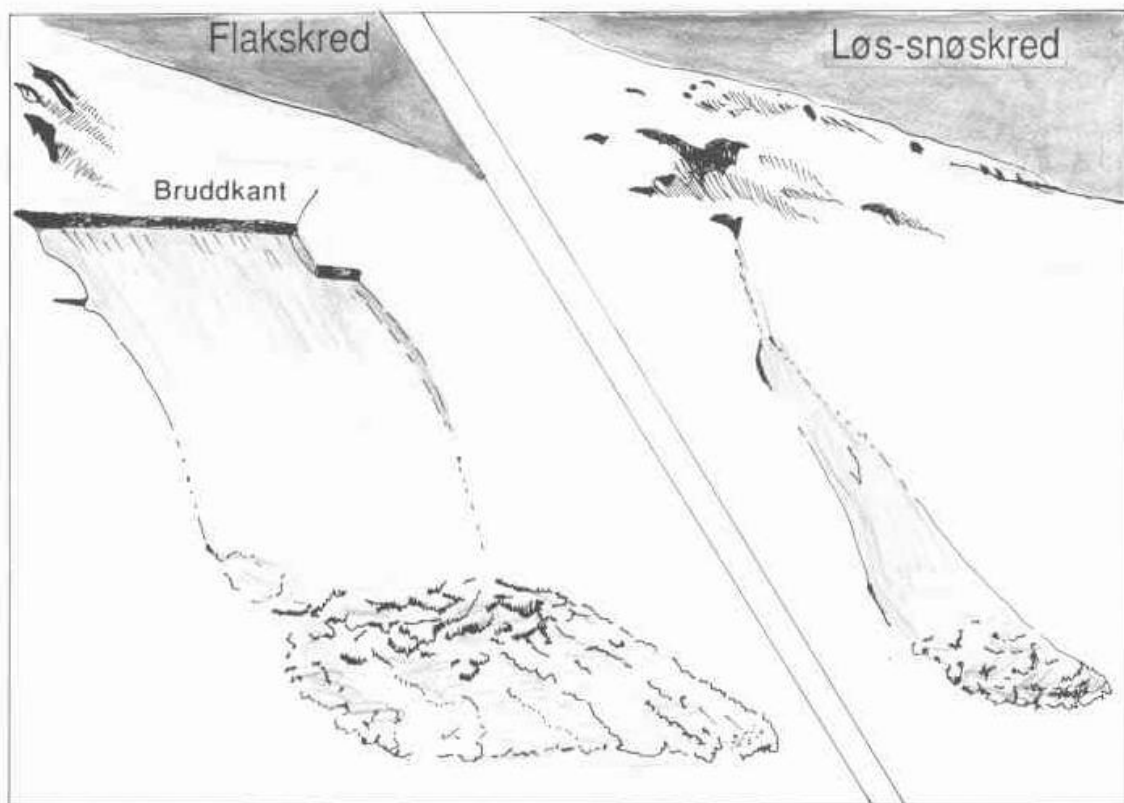
For analyser av georelaterte naturfarer kreves det ofte datasett av ulike formater og fra flere flere fagfelt. Snøskred er i så måte intet unntak.

Snøskred er snø som er satt i bevegelse enten naturlig eller kunstig. Snøskredene avhenger av klimaet i det aktuelle området. Snøskredklimaet deles gjerne inn i flere soner, for eksempel bruker Roeger et al. (2001) tre soner i sine analyser: maritimt, kontinentalt og et overgangsklima mellom disse. Snøskred i maritime klima oppstår oftest under eller rett etter uvær, derfor er værobservasjoner det viktigste verktøyet for vurdering av snøskredfare i dette klimaet. Områder med kontinentalt snøklimate preges av mindre snøfall og kaldere temperaturer enn maritimt snøklimate, derfor er observasjoner av svakheter i snøens struktur vesentlige faktorer for vurdering av snøskred i tillegg til værobservasjoner (Bakkehøi 1987).

Det er vanlig å dele snøskred i to kategorier: Løssnøskred og flaskskred (Figur 2-2).

Løssnøskred oppstår normalt i løs nysnø eller våt snø. Liten kobling mellom snøkrystallene gjør at det skal lite til før snøen løsner. Utløsning skjer gjerne i bratt terreng under eller like etter perioder med kraftig snøfall eller regn. Solstråling og smeltevann kan også utløse løssnøskred. Løssnøskred kjennetegnes ved at det gjerne starter fra ett punkt, og brer seg ut i pæreform.

Flaskskred oppstår ved at større eller mindre stykker snø glir ut langs en bruddkant. Et flaskskred kjennetegnes ved en tydelig bruddkant, og hele snøflak glir ut under skredet. Skredtypen skjer i lagdelt snødekke ved at skjærbrudd oppstår i supersvake sjikt i et glidelag, det vil si et lag som ligger mellom ny og gammel snø. Bruddet forplanter seg nedover glidelaget og fører til at hele snøflak glir ut (Norem 1993).



Figur 2-2 De to typene skred, flakskred og løssnøskred (Norem 1993).

De største skredene oppstår ved store snøfall og kraftig vind etter perioder med kaldt vær. Oftest oppstår bruddkanter i områder som er utsatt for store strekkspenninger, for eksempel under et heng. De største snøskredene og de som forårsaker størst skade tilhører som regel kategorien flakskred (Lied og Kristensen 2003).

Snøskredene utløses ved deformasjon i snøen. Snø på bakken utsettes for tre typer deformasjoner: spenning (eng «tension»), sammentrykking (eng. «compression») og skjærkraft σ_{xz} (eng. «shear»). Skjærkraften er den mest kritiske av disse, og lagets styrke til å motvirke denne, skjærstyrken Σ_{∞} (eng. «shear strength»), er derfor kritisk. Det finnes metoder som gir verdier for snøens stabilitet. En metode bruker skjærstyrke og skjærkrefter for å beregne en snøstabilitetsindeks (Föhn 1987).

Skjærstyrke har to komponenter: kohesjon og friksjon. Kohesjon beskriver hvor godt snøkrystaller og -korn henger sammen. Kohesjon avgjør om svikten fører til løssnøskred eller flakskred. Løssnøskred oppstår ved lav kohesjon, mens flakskredene oppstår når kohesjonen

er stor nok til at blokker av snø henger sammen. Friksjonen beskriver motstanden mot bevegelse mellom snøkorn i forskjellige lag. Friksjonen er større for lag lenger ned i snøen.

2.4 Varsling av snøskred

Varsling av snøskred skjer ved å estimere nåværende og framtidig ustabilitet i snøen (McClung 2002). Forutsigelsen, eller prognosene (eng. «avalanche prediction»), baserer seg på en rekke faktorer som kan påvirke stabiliteten, og dermed forårsake snøskredhendelser.

LaChapelle (1980) beskriver en rekke av disse:

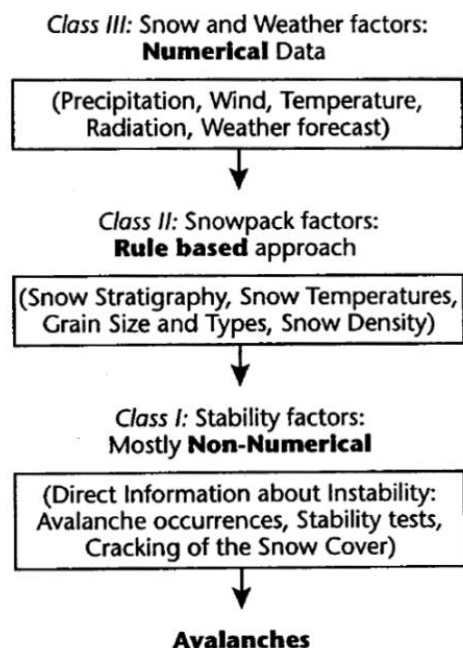
- Meteorologi, blant annet snøfall, vind, regn, solstråling, lufttemperatur
- Terreng, blant annet helning, helningsretning, vegetasjon og strukturer
- Snøavsetning
- Snøens mekaniske kraft og styrke

Målet med snøskredprognoser er å minske usikkerheten om ustabiliteten som følger av snødekkets variasjon i tid eller rom (LaChapelle 1980). Faktorene har varierende grad av usikkerhet, eller entropi. Høyere usikkerhet, det vil si høyere entropi, gjør at koblingen mellom snøskred og informasjonen er mer usikker, og informasjonen blir vanskeligere å tolke. Usikkerheten kan minskes ved å bruke flere ulike, ofte redundante, informasjonskilder (LaChapelle 1980). Gjentakelse av estimatene kan også redusere usikkerheten, det vil si at tidligere kunnskap inngår i analysene. Eksempelvis bør informasjon om snøen helt tilbake til vinterens første snøfall inkluderes (LaChapelle 1980).

Redundansen kan imidlertid føre til store mengder irrelevante data, og data som minimerer usikkerhet bør derfor velges ut. McClung (1993) har undersøkt usikkerheten til de faktorene som LaChapelle (1980) beskriver. Sammenlikningen ble utført ved å analysere registreringer av snøfall, meteorologi og registrerte snøskred over en 11-årsperiode. Funnene tyder på at de sikreste faktorene er snøfall, nysnøens vekt, vanninnhold av ny nedbør, total snøfall under storm og nysnøens dybde. De viser også en sammenheng med vindhastighet, retning og snøens tetthet.

Informasjonen som brukes kan kategoriseres i tre klasser (Figur 2-3). Stabilitetsfaktoren er den faktoren som med mest sikkerhet kan knyttes til snøskred, mens snø- og værparametre er mest usikre. På den annen side er snø- og værparametrene ofte representert som numeriske

verdier, i motsetning til de to andre klassene (McClung og Schaerer 1993), og kan utnyttes i numeriske modeller.



Figur 2-3 Tre klasser for tolking av snøstabilitet. Informasjon med høyest entropi er plassert øverst (McClung 2002).

Prognosene kan i følge produseres for forskjellige målestokker: Synoptiske prognoser for områder på over 1000 km², mesoskala over 100 km² og mikroskala for mindre områder (McClung og Schaerer 1993). Jo mindre områder som vurderes, jo vanskeligere er det å utarbeide prognoser. En av grunnene er at effekten av topografien på snøstabiliteten blir større (McClung 2002).

Flere studier har vist hvordan snø- og værparametre kan brukes til å lage prognoser for snøens stabilitet. SAFRAN-CROCUS-MEPRA, etablert i Frankrike, er en kjede av tre modeller som produserer varsler om snøskredfare både for geografiske områder og for ulike høydesoner. SAFRAN estimerer relevante meteorologiske parametre for hver time basert på observasjoner og 48-timers prognoser. Dataene fra SAFRAN brukes av CROCUS til å estimere snølaget for diverse høydelag og helninger. Basert på resultatene fra disse to modellene, fastsetter ekspertsystemet MEPRA til slutt snøskredfaren (Durand et al. 1999). Studien av Haraldsdottir et al.(2004) demonstrerer hvordan modellen kan overføres til andre klimatiske forhold ved hjelp lokale tilpasninger.

Lehning et al. (1999) beskriver hvordan et nettverk av automatiske værstasjoner brukes i den sveitsiske snødekkemodellen SNOWPACK for snøskredvarsling. Dette gir beregninger for utviklinga i snølagene med høyere temporal og romlig oppløsning enn tradisjonelle, manuelle observasjoner. Seinere studier av Lehning et al. (2004) indikerer hvordan SNOWPACK potensielt kan utnyttes i beregninga av stabilitetsindekser.

Påvirkning av topografien, vegetasjon og vind vil medføre at snøfallet fordeles ulikt i terrenget, og snødrift kan i etterkant gjendistribueres og avsette snøen på nye områder (Lehning et al. 2000). Driften oppstår når vindhastigheten når en terskelverdi der vindens løftekraft setter snøpartiklene i bevegelse. Terskelverdien avhenger først og fremst av bindingen mellom snøpartiklene som oppstår ved metamorfose i snølaget. Bindingenes styrke varierer med temperatur og luftfuktighet, men øker generelt med tida. Når partikler i drift treffer bakken igjen, vil de kunne bryte bindingene mellom andre snøpartikler, og forårsake at andre partikler beveger seg og dermed øke snødriften.

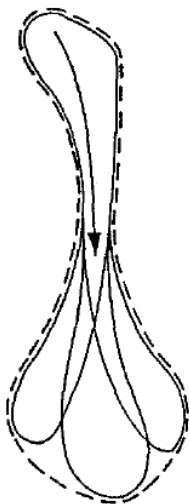
Numeriske simuleringer av snødrift har blitt utviklet som et alternativ til feltstudier og eksperimenter i vindtunnel. Det eksisterer to typer modeller for numerisk simulering av snødrift. Den første er basert på beregning av vindfelt, den andre på fluidmekanikk. Mens sistnevnte metode først og fremst brukes for simulering rundt bygninger, kan en vindfelbasert modell simulere snødrift i terreng på flere kvadratkilometer. Den krever en egen vindmodell for å beregne vindfeltet. Vindmodeller antar ofte at terreng er relativt jevnt og lite komplekst. (Jaedicke 2001)

Til tross for at numeriske snødriftmodeller eksisterer, er det i følge Lehning et al. (2000) og Durand et al. (2005) vanskelig å oppnå nøyaktige resultater på grunn av kompleksiteten i de fysiske prosessene. I 1999 ble de første forsøkene på høyoppløselig snødriftsmodell som beskriver interaksjonen mellom snødrift, topografi og atmosfære utført (Lehning et al. 2000). Nishimura et al. (2005) viser en framgangsmåte for å kombinere SNOWPACK, som ellers kun gir punktdata, med en snødriftsmodell for å beregne lokale variasjoner i snøforholdene.

En av de kritiske faktorene for at snøskred skal utløses er helningen i utløsningssonen (Maggioni og Gruber 2003). Selv om det ikke er mulig å finne en felles minimums- og maksimumshelning for utløsningssoner, brukes det ofte empiriske verdier. Maggioni et al.

(2003) ekskluderer for eksempel områder med helning under 30° og over 60° fra å være utløsningssoner. Mens graviteten anses for liten til å løse ut snøskred under minimumshelningen, sørger mange småskred for at det sjelden samles snø i områder over maksimumshelningen (Maggioni og Gruber 2003).

Snøskredenes avhengighet av topografi gjør dem til tilbakevendende hendelser, og etterfølgende skred går derfor ofte i samme bane (Furdada et al. 1995). Det er derfor mulig å kartlegge hvilke områder skredbanene vil berøre, selv om hvert skred kan ha forskjellig lengde og løp (Figur 2-4). Skredbanene består av en utløsningssone, hvor skredet starter, et skredløp, hvor skredet beveger seg, og en utløsningssone, hvor skredmassene samles. Skredene kan enten følge en kanalisert skredbane, eller ha en åpen skredbane hvor skredet bredde er konstant eller økende. Skredene bremser normalt først ved en helning på 20-30°. Skredvinder kan imidlertid gå lenger enn selve skredet og forårsake skade i områder nedenfor utløpssonen (Norem 1993).



Figur 2-4 Kartlagt skredbane (stiplet linje) og faktiske skred Furdada et al. (1995).

Kunnskapen om skredbaners egenskaper gjorde Furdada et al. (1995) i stand til å kartlegge skredbaner ut fra disse faktorene:

- Høyde og helning
- Topografi og helningsvinkel
- Helningens morfologi og ruhet
- Vegetasjon
- Helning i forhold til dominerende vindretning

Omrisset av skredbaner i et område kan registreres basert på kjennskap om tidligere snøskred, områdets egenskaper og felt- eller fjernanalyse. Furdada et al. (1995) brukte for eksempel flyfoto og feltanalyser i sin kartlegging. Skredbanedataene kan brukes i planlegging, forebygging og videre analyser av snøskredutsatte områder.

2.5 Varslingssystemer

Varsling av snøskred og andre naturfarer kan bidra til å ta beslutninger for å unngå eller begrense skadeomfang. For å gi beslutningstakere den nødvendige støtten kan det etableres et varslingsystem, også kalt tidligvarslingsystem (eng. «early warning system»). Hamilton (1997) definerer varslings (eng. «warning») som en «order to take an action, such as evacuate an area». Prognose (eng. «forecast») eller forutsigelser (eng. «prediction») er derimot kunngjøringer om sannsynligheten for at en naturkatastrofe eller hendelse kan skje innenfor en tidsperiode, og er basisen for et varsel.

I følge Einstein et al. (2007) utsteder et varslingsystem varsler basert på et sett av indikatorer eller signaler. Formålet er å kunne gi informasjon som gjør folk i stand til å unngå eller redusere konsekvensene av naturfarene. Systemet består av et sett med apparater, modeller og prosedyrer, og inkluderer konsekvensvurderinger av faren for å sikre at de rette mottiltakene kan settes i verk (Einstein og Sousa 2007). Siden disse utredningene er vanskelige og unøyaktige, vil vurderinger av flere alternativer ofte være den beste løsningen.

Basert på kasusstudier, konkluderer Einstein et al. (2007) at varslingsystemer for en naturfare må ha de følgende seks kritiske elementene:

1. Selve faren eller en situasjon som kan forårsake den må registreres av instrumenter.
2. Informasjonen tolkes av beslutningstakere sentralt basert på erfaring og modeller.
3. Et initielt varsel publiseres til berørte områder.
4. Informasjonen oppdateres underveis av flere observasjoner.
5. Varselet oppdateres, for eksempel ved økning eller avlysning av fare.
6. Mottiltak besluttet på lokalt eller regionalt nivå.

Hvor lang tid før en hendelse et varsel skal gis avhenger av faren. For jordskred gis korttidsvarsler gjerne noen timer eller dager før en hendelse, midttidsvarsel noen måneder til

år før, men langtidvarsler gjerne gis tiår før hendelsen (Hamilton 1997). Tilsvarende tidsperioder vil trolig også gjelde for snøskred. Snøskredvarsler, som er kortidsvarsler av snøskred, angir snøstabiliteten for både nåsituasjonen og framtidig situasjon (McClung 2002). Siden vær-situasjonen kan påvirke snøstabiliteten sterkt, er værprognosenes usikkerhet avgjørende for påliteligheten til snøstabilitetsprognosene. Usikkerheten øker dermed jo lenger inn i framtida prognosene gjelder (McClung 2002).

Studier viser at det finnes operative varslings-systemer for naturfarer som bruker multikriterieanalyser og GIS. Einstein et al. (2007) trekker fram to eksempler; et varslings-system for tsunamier i Puerto Rico og «IFKIS», et sveitsisk varslings-system for snøskred. Det sistnevnte eksemplet beskriver tre tiltak for å forbedre håndteringen av snøskredrisiko; ei sjekkliste med krav til ansvarlige organisasjoner, et opplæringsprogram og et informasjonssystem for bedre dataflyt (Brundl et al. 2004). Yu et al. (2007) beskriver et system for varslings-av jordskredfare i forbindelse med tyfoner. Informasjon fra GIS-analyser leveres automatisk til et sentralt krisesenter, hvor fageksperter bruker informasjonen til å vurdere skredfaren i utsatte områder. Erfaringer tyder på at antallet omkomne har sunket etter at systemet er tatt i bruk (Yu et al. 2007).

2.6 Numeriske værmodeller

Som vi har sett i de foregående kapitlene, påvirker vær-situasjonen snøstabiliteten vesentlig. Vær-situasjonen beskrives av fagfeltet meteorologi, som er studien av atmosfæren og de prosessene og fenomenene som bestemmer været (Eagleman 1980). Meteorologiske prognoser utarbeides for å beregne framtidig vær-situasjon. Prognosene har blitt stadig bedre de siste femti årene gjennom vitenskapelige framskritt og utviklingen av numeriske, datamaskinbaserte værmodeller, ofte kalt «Numerical Weather Prediction» (Kalnay et al. 1998), heretter kun kalt værmodell. Værmodeller knytter atmosfæriske variabler som temperatur, vindstyrke og vindretning sammen ved hjelp av matematiske ligninger. Som for snøstabilitetsprognoser, kan meteorologiske prognoser deles i tre i henhold til dekning og oppløsning: Mikroskalavarsler gis med oppløsning 1 cm til 1 km, mesoskalavarsler fra 1 til 100 km og makroskalavarsler fra 100 til 1000 km (Eagleman 1980).

I Norge brukes ofte «High Resolution Limited Area Model» (HIRLAM), en mesoskala værmodell med dekning for Europa. Modellen er en hydrostatisk modell som utvikles ved

samarbeid mellom flere europeiske meteorologiske organisasjoner (Kållberg og Montani 2006). Modellen krever prognoser fra en global modell for å få den fullstendige vær-situasjonen. Atmosfæren modelleres i et tredimensjonalt rutenett, hvor hver rute har verdier for trykk, temperatur, fuktighet og vind. Modellen kan produsere prognoser i forskjellig oppløsning (met.no 2008).

Data fra værmodeller har ofte en lavere oppløsning enn andre romlige data. Skaugen (2002) presenterer derfor en framgangsmåte for å modeller data fra HIRLAM med 11-kilometeres oppløsning til høyere oppløsning for bruk i hydrologisk modellering. Metoden deler opp HIRLAM-dataene i mindre deler, og benytter interpolasjon for å reprodusere verdiene for hver celle.

Produksjon av prognoser for fjellområder er vanskeligere enn for andre områder, både på grunn av mangel på værstasjoner og på grunn av at de meteorologiske variablene har større lokale forskjeller her enn i flatere terreng. Observasjoner fra en værsstasjon i fjellterreng representerer derfor forholdene i et mindre område enn observasjoner fra stasjoner i lavlandet. Forskning innen fjellklima gjør oss likevel til en viss grad i stand til å beskrive og kvantifisere disse meteorologiske variablene (Barry 1992).

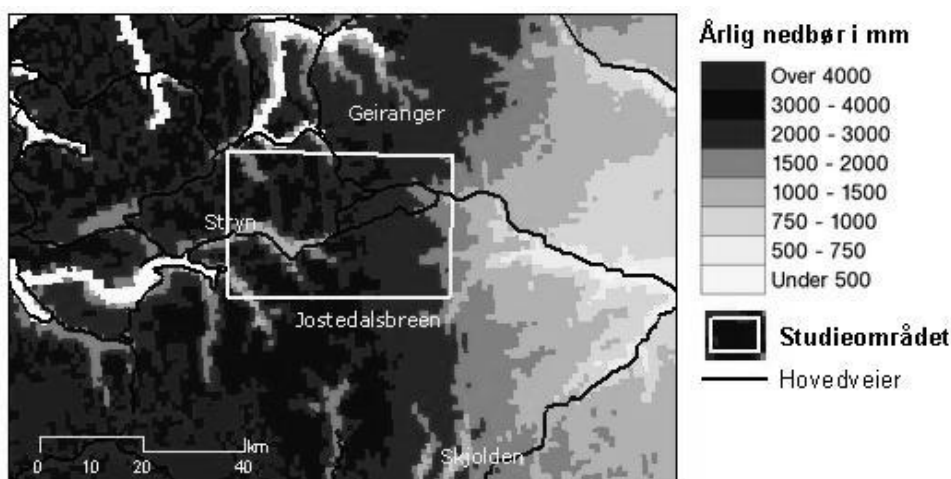
Flere studier har sett på sammenhengen mellom snøskred og prognoser fra værmodeller. Roeger et al. (2003) sammenliknet prognoser fra to mesoskala værmodeller mot observasjoner av enkelte meteorologiske parametre som er relevante for snøskredutløsning. Til tross for at en del svakheter ble funnet, anbefaler studiene at værmodeller brukes for å gjøre at skredeksperter tidligere er i stand til å vurdere situasjonen. Tilsvarende har studier fra Himalaya vist en sammenheng mellom snøskred og snøskredvarsler basert på prognoser fra en mesoskala værmodell (Srinivasan et al. 2005). Prognoser 3 dager fram i tid ble anbefalt brukt i varslinga, og en romlig oppløsning på 2 kilometer ble foreslått.

3. Feltbeskrivelse

Det snøskredutsatte fjellområdet Strynefjell ble valgt som studieområde (Figur 3-2).

Strynefjellet har et karakteristisk vestlandsterreng med store høydeforskjeller. Bunnen av denne dalen ligger mellom 500 og 800 moh., mens fjellene rundt når opp i høyder på opp til 1800 moh. Tregrensa ligger på rundt 800 moh. Norges Geotekniske Institutt (NGI) har etablert en forskningsstasjon ved Fonnbu øverst i Grasdalen.

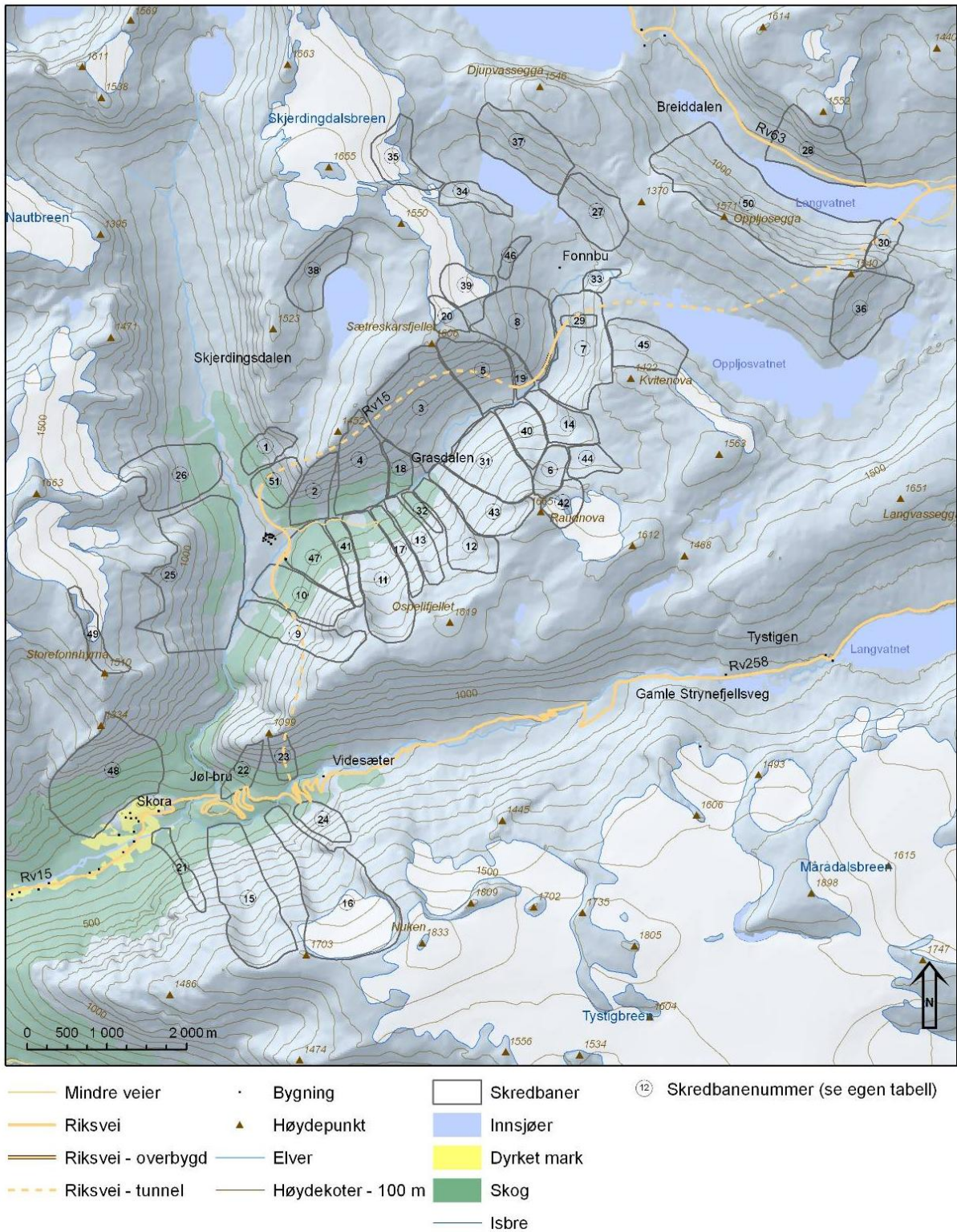
Studieområdet ligger i indre deler av Nordfjord, og ligger i nærheten av vannskillet mellom Øst- og Vestlandet. Området har et maritimt klima, og snøskredaktiviteten påvirkes i stor grad stormaktiviteteten i Atlanterhavet (Bakkehøi 1987). Området mottar mindre nedbør enn naboområdene i vest og sør, og i øst finner man noen av områdene med minst nedbør i landet. Ved Fonnbu faller det mellom november og april i gjennomsnitt 855 mm nedbør, og maksimal snødybde varierer mellom 1,3 og 4,7 meter (Bakkehøi 1987). Nedbør reduseres betydelig i retning øst (Figur 3-1). Nedbøren antas også å være avhengig høyden (Figur 3-3).



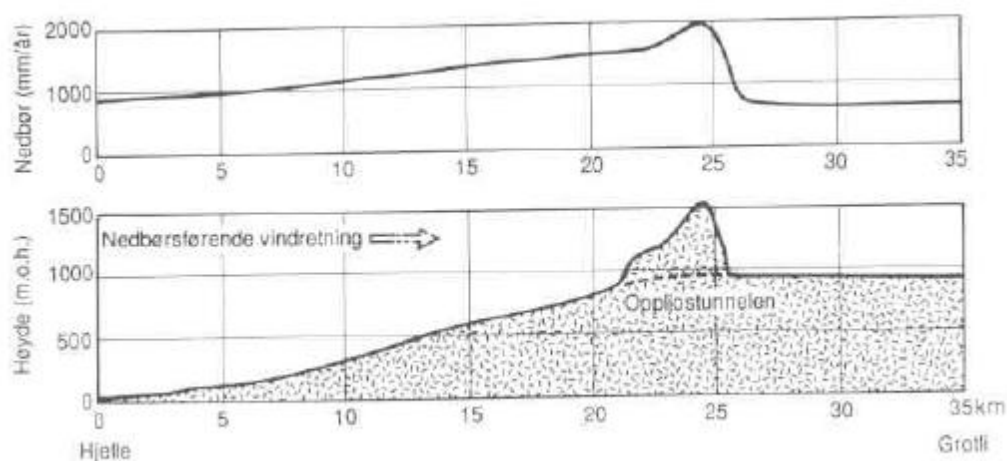
Figur 3-1 Årlig nedbør i perioden 1971-2000. Data fra meteorologisk institutts WMS-tjeneste (<http://norgenacloudy.oslo.dnmi.no/wmsmapserv>).

Den generelle vindretningen i området antas å være vestlig eller sørvestlig. Relative fordelinger av vindretningen ble sammenliknet for noen nærliggende værstasjoner (Figur 3-4). Vindhastigheten varierer stort mellom stasjonene. Mens Stryn-Kroken opplever over 5 m/s vindhastighet i kun 2 % av tilfellene, er tilsvarende tall for Sognefjellhytta 38 % og Kråkenes 72 %. De store forskjellene kommer av den lokale topografiens påvirkning på både vindretning og vindhastighet.

Strynefjellet

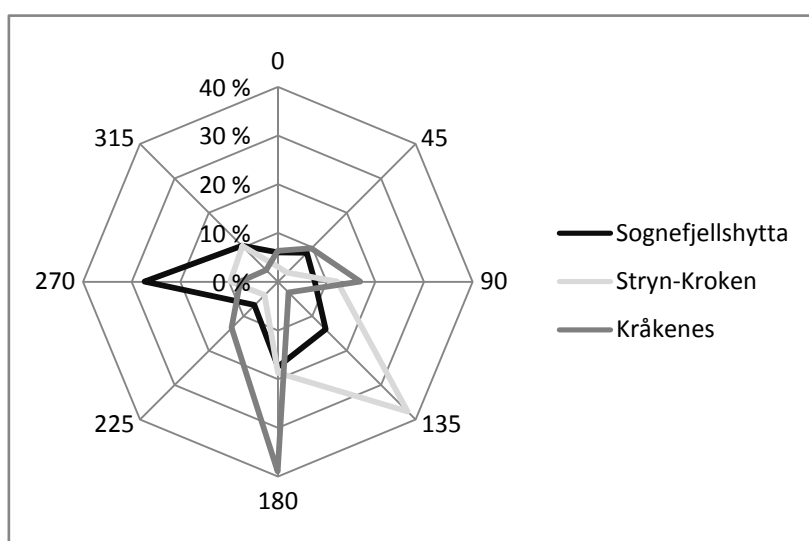


Figur 3-2 Grasdalen med Riksvei 15. Skredbanenummer angitt i Vedlegg F.



Figur 3-3 Lengdeprofil og nedbørsmengde langs RV 15 over Strynefjellet. (Norem 1993).

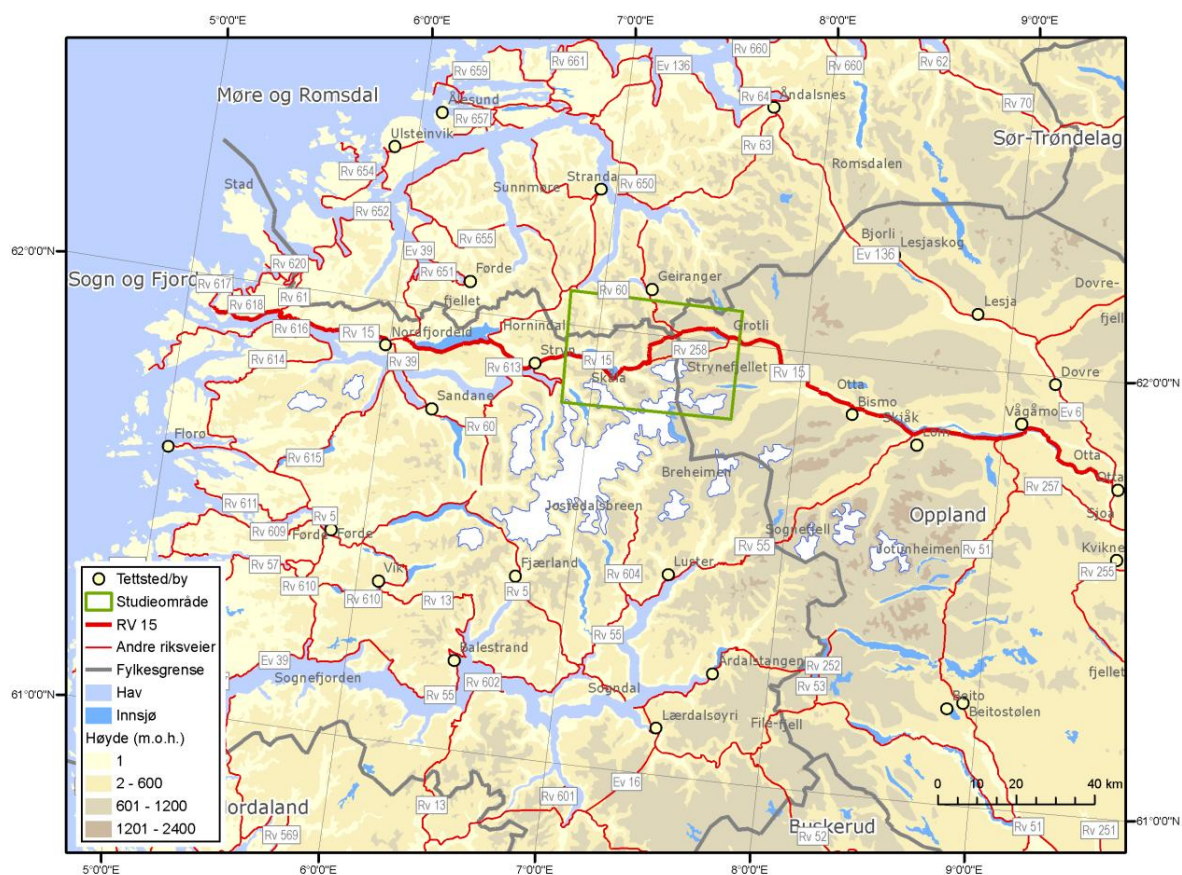
De meteorologiske forholdene og topografien gjør at studieområdet er utsatt for stor snøskred-aktivitet i vintersesongen. Studier av Kronholm et al. (2006) viser at dager med snøskred for dette området med rimelighet kan spås ut fra et sett med enkle meteorologiske parametre. Den viktigste parameteren er nedbøren, og de fleste snøskred skjer under eller rett etter en snøstorm. Nedbøren foreslås gitt som en 1-, 2- og 3-dagers sum. Resultatene tyder på at vindhastighet og temperatur også påvirker stabiliteten. Sammenhengen med temperatur krever imidlertid mer komplisert tolkning enn de andre, da høye temperaturer både kan føre til stabilisering og økt fare for våte snøskred (Kronholm et al. 2006).



Figur 3-4 Vindroser for desember-april 1998-2007 fra eklima.met.no

På grunn av framtidige klimaendringer, forventes antall dager med nedbør å stige i området (Kronholm et al. 2006). Kronholm et al. (2006) antar derfor at snøskredaktiviteten i området vil øke de neste 100 årene, men understreker at flere studier må gjennomføres for å eventuelt bekrefte dette.

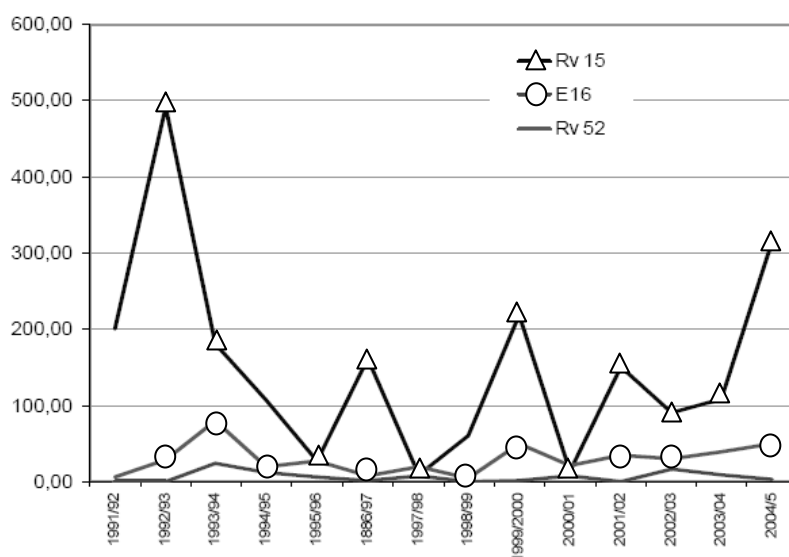
Riksvei 15 passerer gjennom studieområdet (Figur 3-5). På grunn av topografien og skredfaren er veien lagt gjennom 3 lengre tunneller. I tillegg er det bygget et skredoverbygg for et av de mest utsatte områdene. Veien er en av stamveiene mellom Vestlandet og Østlandet, og gjennomsnittlig passerte 735 kjøretøy gjennom Ospelitunnellen på Strynefjellet daglig i 2006. Tallet er av samme størrelsesorden som andre fjelloverganger i området, som Filefjell (668) og Hemsedalsfjell (878), men er lavere enn andre strekninger langs Rv15 som Stryn (3600) og Otta (5000). Trafikken er lavest i vintermånedene med ca 300 kjøretøy daglig. Veien er viktig for nyttetrafikken med 16 ekspressbusser som trafikkerer området daglig og en andel tyngre trafikk på ca 20 %. Trafikkmengden vil dog trolig øke de nærmeste årene på grunn av veiutbygging i Sogn og Fjordane (Statens vegvesen 2006).



Figur 3-5 Kart over veinettet i regionene.

Riksvei 15 stenges i gjennomsnitt 55 timer årlig i tillegg til at det avvikles kolonnekjøring i 140 timer. Disse tallene varierer fra år til år (Figur 3-6). I 2004 var for eksempel veien stengt i 315 timer. Hovedårsaken til veistengningene er snøskredfare , og veien stenges vesentlig oftere på grunn av snøskred eller snøskredfare enn andre viktige veier i området. Statens vegvesen anser kostnadene for det lokale næringslivet ved stengning som svært høye. Rassikring av veien anses derfor som et av de viktigste tiltakene for riksveien (Statens vegvesen 2006).

Timer Stengt



Figur 3-6 Årlig antall timer veistengning av RV 15 sammenliknet med E16 Filefjell og Rv 52 Hemsedalsfjellet (Statens vegvesen 2006).

4. Metoder og resultater

I denne studien skulle vi undersøke en framgangsmåte for bruk av multikriterieanalyser i snøskredvarsling ved beregning av snøstabilitetsprognoser. Basert på teorien beskrevet i forrige kapittel, skal vi i dette kapitlet beskrive den valgte framgangsmåten. Vi skal først se på utvikling av den valgte modellen og dens datagrunnlag (kapittel 4.1). Deretter følger kalibreringa av datagrunnlaget og modellene (kapittel 4.2). Vi skal så vise hvordan modellen ble implementert (kapittel 4.3), før vi til slutt viser resultatene fra testing og validering av modellen (kapittel 4.4). Metodene og resultatene gir grunnlag for diskusjonen som vi foretar i neste kapittel.

4.1 Valg av snøstabilitetsmodell

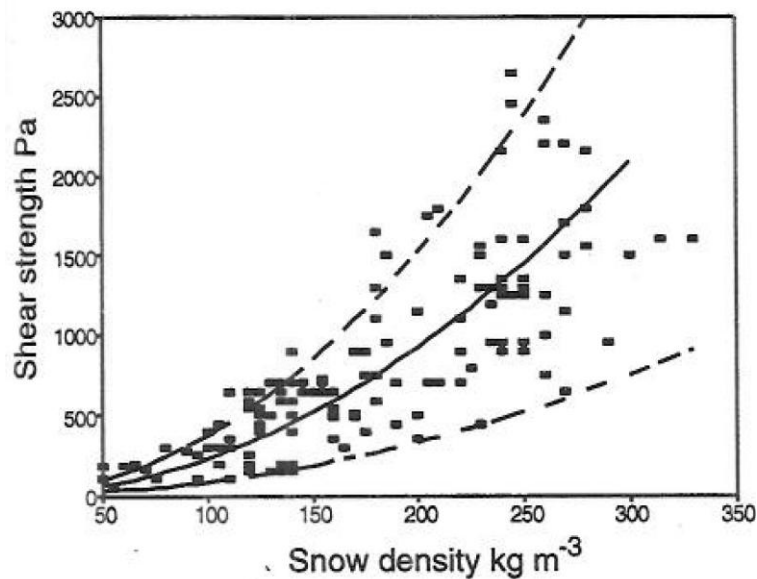
Varsling av snøskredfare skjer ved hjelp av prognoser for snøens ustabilitet – både for situasjonen nå og i framtida. Kapittel 2.4 listet en rekke faktorer som kan vurderes i beregninga av snøens stabilitet.

I denne studien ble det valgt å bruke noen av disse faktorene i multikriterieanalyser for å beregne snøens stabilitet som en snøstabilitetsindeks. Snøstabilitetsindeksen er et estimat på snøens stabilitet, og dermed en indikasjon på hvorvidt snøskred kan oppstå under de rådende snøforholdene. Jo høyere snøstabilitetsindeksen er, jo større belastning tåler snøen, og desto mindre er sannsynligheten for at snøskred utløses. Indeksen beregnes ut fra forholdet mellom skjærstyrken av det kritiske sjiktet og skjærkreftene på det svake sjiktet. Studien valgte å bruke en enkel fysikk-basert modell beskrevet av Föhn (1987) for beregning av snøstabilitetsindeks for tørre flakskred

$$S = \frac{\Sigma_{\infty} + \sigma_{zz}\phi}{\sigma_{xz}} \text{ (Formel 1)}$$

S er stabilitetsindeksen, Σ_{∞} skjærstyrken, σ_{zz} den minste friksjonsvinkel for det minst stabile laget, ϕ er en justeringsfaktor for normallast på det svake sjiktet og σ_{xz} skjærkreftene på det svake sjiktet. Formelen har en del forutsetninger som at den kun er gyldig for skred i forbindelse med snøstorm (engelsk «direct-action»).

Formelens skjærstyrke – Σ_{∞} – i det kritiske sjiktet er avhengig av det kritiske sjiktets kornform, kornstørrelse, alder og temperatur. Verdien av skjærstyrken hentes normalt fra direkte målinger av det kritiske sjiktet, selv om snødekkemodeller også kan brukes. Modellene har en del svakheter, så empiriske vurderinger av skjærstyrke vil ofte være et enklere alternativ og kan i mange tilfeller gi bedre resultater. Verdien av skjærstyrken kan variere betraktelig, og er eksponensielt avhengig i 2-orden av snøens tetthet og snøkrystallens struktur (Conway og Wilbour 1999). Figur 4-1 viser typiske verdier for tetthet og skjærstyrke.



Figur 4-1 Observert skjærstyrke og snøtetthet, og en «best-fit» eksponensiell kurve (heltrukket linje). De andre linjene viser standardavvik (Conway og Wilbour 1999).

Skjærkreftene er en funksjon av gravitasjonskraften parallelt med sjiktet og lasten på det kritiske sjiktet over. Skjærkreftene kan beregnes ut fra følgende formel:

$$\sigma_{xz} = \rho g h \cos^2 \psi \quad (\text{Formel 2})$$

Ψ er sjiktets helning, g er gravitasjon, h er høyden på snøbrettet over, ρ = tettheten og $\rho g h$ – lasten. Verdiene fra formelen kan tolkes forskjellig, og må verifiseres mot observasjoner. På grunn av begrenset tilgang på data og ønske om gunstig implementasjon, ble en forenklet versjon brukt i studien:

$$\text{Stabilitetsindeks} = \frac{\text{Skjærstyrke}}{\text{snødekkets vekt} * \sin(\text{helning})} \quad (\text{Formel 3})$$

Basert på erfaringer fra andre studier ble formelen tilpasset lokale forhold. Fra studien av Kronholm et al. (2006) var det for eksempel kjent at skredaktiviteten i studieområdet var

knyttet til snøstormaktivitet. Snødekket brukt i formelen var derfor en akkumulert nedbørsverdi for de siste fem dagene. Det ble ikke skilt mellom nedbør i form av snø og regn, slik at regn også kunne føre til ustabilitet. Regns påvirkning på stabiliteten i studieområdet understøttes for øvrig i studien av Kronholm et al. (2006). En annen lokal tilpasning var en antakelse om stabilisering av snødekket etter 3 sammenhengende dager med temperaturer over 0°C. Dette ble gjennomført ved å nullstille akkumulasjonen av nedbøren for de tidspunktene hvor dette kriteriet oppfyltes. Grunnlaget for denne antakelsen var også resultatene av studien av Kronholm et al. (2006), som indikerte en stabilisering ved høye temperaturer.

4.1.1 Datagrunnlag

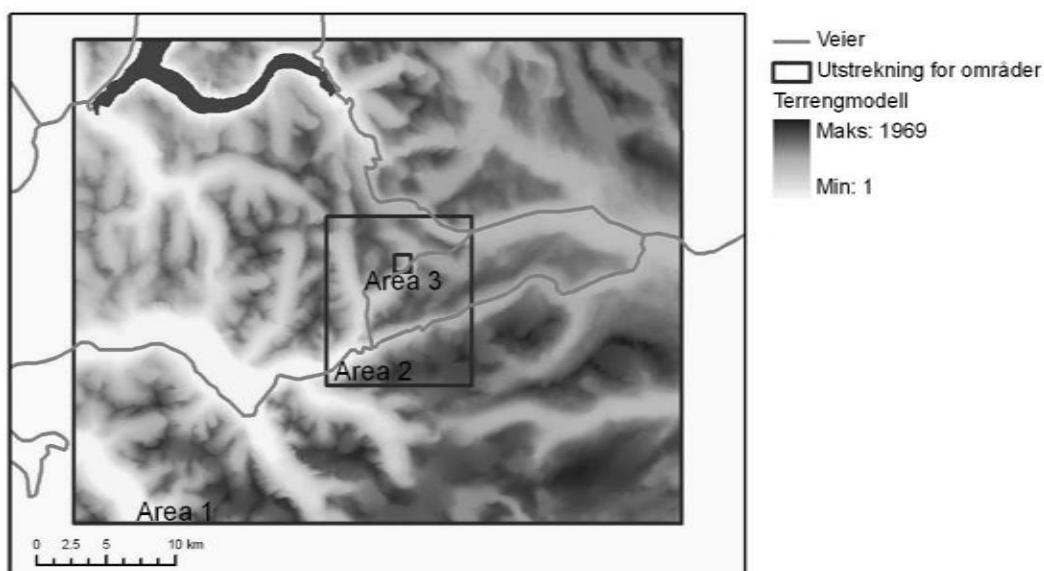
Datagrunnlaget for snøstabilitetsformelen ble valgt ut fra en antatt sammenheng med ustabilitet. Kun terrengfaktorer og meteorologiske faktorer ble inkludert (Tabell 1). Dette var data med høy entropitet, det vil si at det ville kreves mer tolkning for å finne sammenhengen mellom dataene og snøskredaktiviteten. Det var likevel mulighet for å inkludere data med høyere entropi indirekte ved å fastsette skjærstyrken manuelt i applikasjonen.

Tabell 1: Datagrunnlaget i snøstabilitetsmodellen.

<i>Datasett</i>	<i>Datatype/oppløsning</i>	<i>Format</i>	<i>Produsent</i>	<i>Merknader</i>
Terrengmodell - Høyde - Helning - Helningsretning	Raster 25 m	Raster	Statens kartverk	
Værobservasjoner - Temperatur - Nedbør - Vindretning - Vindhastighet	Punktdata	Tekst	NGI	Lastet ned fra fonnbu.no
Værprognoser - Temperatur - Vindretning - Vindstyrke - Nedbør	Punktdata, basert på værmodell med 8 km oppløsning	XML	Met.no	Lastes ned fra yr.no
Skredbaner	Vektordata	Shape	NGI	
Skjærstyrke	Numerisk	-	-	Konstant 400 N i studieperioden
Bakgrunnsdata	Vektor	Shape	Statens kartverk	1:50.000

Terrengparametre ble derivert fra en digital terrengmodell fra Statens kartverk med 25 meters oppløsning. Terrengmodellen var produsert på grunnlag av blant annet høydekurver, terrengpunkter og vanntema og en veidatabase (geonorge.no 2008). Standardavviket i høyde for datasettet var anslått til 4-6 meter (Terrengmodeller 2008).

For å kunne variere datasettstørrelse og analysetid ble tre områder av forskjellig størrelse klippet ut (Figur 4-2). Utstrekningen på det største av disse områdene var ca 44 x 35 km, og det dekket både studieområdet og fjellområdene rundt. Det nest største dekket kun studieområdet, ca 11 x 12 km. Det siste området dekket kun en av skredbanene, og dekket et område på omtrent 1,2 x 1,3 km.



Figur 4-2 Terrengmodellen med dekning av de tre områdene som ble brukt i studien.

Meteorologiske observasjoner ble hentet fra værstasjonen på Fonnbu, ca 930 moh. Værstasjonen inneholdt sensorer som observerte flere meteorologiske variabler på samme tidspunkt, jf. oversikten over sensorer på værstasjonen i Vedlegg I. Observasjonene ble loggført, deretter automatisk overført til en sentral server eller pc per sms, og til slutt publisert på nettstedet til Fonnbu forskningsstasjon, http://www.fonnbu.no/data/fonnbu_group_data.txt. Dataene var i tekstformat, hvor hver observasjon utgjorde ei linje, og attributtene adskilt med tabulator.

I tillegg ble data fra Statens vegvesen sin værstasjon på Kvitenova (ca 1400 moh.) og met.no sin stasjon Stryn-Kroken (208 moh.) brukt som sammenlikningsgrunnlag. Avstanden mellom Fonnbu og Kvitenova var ca 1,5 kilometer, mens Stryn-Kroken lå ved Stryn, ca 40 kilometer vest for Fonnbu. Oppsett og overføringsrutiner for disse stasjonene var ikke kjent. Dataene ble publisert på nettstedet <http://vegklime.vegvesen.no/> og <http://eklima.no>. Mens dataene fra Kvitenova kun var tilgjengelige som html og dermed vanskelige å hente ut automatisk, kunne dataene fra Stryn-Kroken kjøres ut i form av rapporter.

Tilgang til oppdaterte prognoser fra værmodeller skjedde via internettsidene yr.no. Oppdaterte prognoser ble publisert hver 6. time. Prognosene ble produsert av en mesoskala værmodell, HIRLAM. Underveis i denne studien byttet DNMI ut sin værmodell, HIRLAM10, med en forbedret modell, HIRLAM8 (Haugen 2008). Oppløsningen på modellen ble samtidig redusert fra 10 kilometer til 8 kilometer. Strukturerne på dataene fra yr.no endret seg derimot ikke, og hadde ikke noe praktisk betydning for applikasjonen.

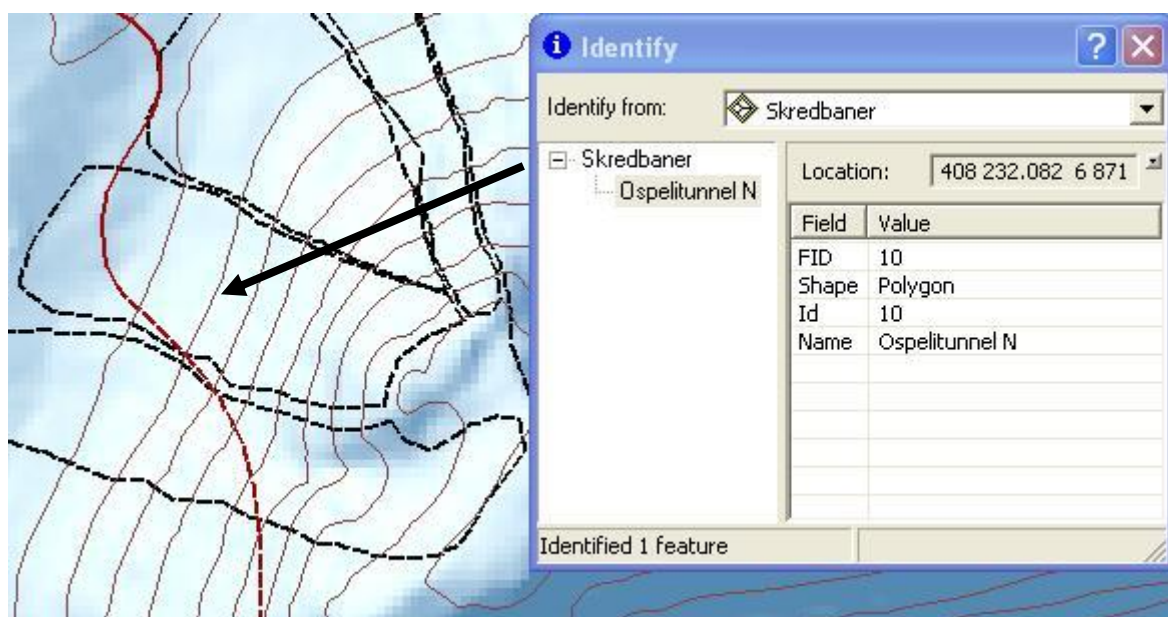
```
<weatherdata>
  <location>
    <name>Grasdalen</name>
    <type>Dal</type>
    <country>Norge</country>
    <timezone id="Europe/Oslo" utcOffsetMinutes="60" />
  </location>
  <links>
    <link id="xmlSource" url="http://www.yr.no/sted/Norge/Sogn_og_Fjordane/Stryn/Grasdalen/varsel.xml" />
  </links>
  <forecast>
    <text>
      <location name="Sogn og Fjordane" id="0614">
        <time from="2008-03-24T13:00:00" to="2008-03-26T01:00:00">
          <title>Mandag og tirsdag</title>
          <body>Skiftende bris. På kysten periodevis [...]</body>
        </time>
      </location>
    </text>
    <tabular>
      <time from="2008-03-24T18:00:00" to="2008-03-25T00:00:00" period="3">
        <!-- Valid from 2008-03-24T18:00:00 to 2008-03-25T00:00:00 -->
        <symbol number="13" name="Snø" />
        <precipitation value="1.7" />
        <!-- Valid at 2008-03-24T18:00:00 -->
        <windDirection deg="271.2" />
        <windSpeed mps="1.4" name="Flau vind" />
        <temperature value="-7.7" />
      </time>
    </tabular>
  </forecast>
</weatherdata>
```

Figur 4-3 Utdrag fra svar fra yr.no på forespørsel etter varsel for Grasdalen 24. Mars 2008 kl 15:30.

Yr.no koblet prognoser til stedsnavn, og ga tilgang til grafiske prognoser for et sted via en URL. Tilgang til numeriske data ble gjort ved å legge til «varsel.xml», for eksempel «http://www.yr.no/place/Norway/Sogn_og_Fjordane/Stryn/Grasdalen/varsel.xml».

Forespørslene returnerte ei XML-fil med prognosene for nedbør, temperatur, vindhastighet og vindretning for 6-timersperioder 5 dager fram i tid, og for 24-timersperioder mellom 5 og 10 dager fram i tid (Figur 4-3).

For å avgrense potensielle skredløp, og spesielt utløsningssoner, ble det brukt et eget datasett for skredbaner (Figur 4-4). Skredbanedatasett var produsert av NGI, men manglet metadata eller dokumentasjon. Som for skredbanene i studien av Furdada et al. (1995) representerte et enkelt polygon antatt utstrekning for skredbaner uten inndeling i skredbanenes tre soner. Det var ingen overlapping mellom skredbanene, med unntak av skredbanen «Oppljostunnel W» som lå fullstendig inne i skredbanen «Svartfjellet».



Figur 4-4 Skredbanene

4.2 Implementering av modeller

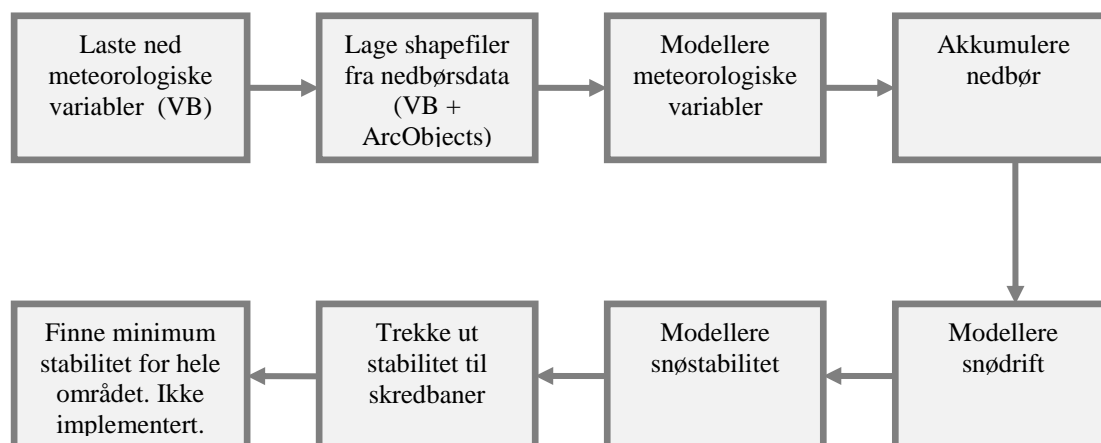
Snøstabilitetsmodellen ble inkludert i en multikriterieanalyse, som ble bygget opp i form av en egen applikasjon. Applikasjonen implementerte GIS-funksjonalitet for å beregne de aktuelle kriteriene. Applikasjonen tok seg av blant annet kommunikasjon med bruker, datahåndtering og håndtering av modeller.

Det ble hovedsakelig brukt to typer programvare i løsningen: ArcGIS ModelBuilder fra ESRI for bygging av modellene og Visual Studio fra Microsoft for utvikling av applikasjonen (Tabell 2). ArcGIS er en pakke med GIS-applikasjoner fra ESRI for administrere, utveksle og bruke geografisk informasjon. Microsoft Visual Studio er et utviklingsmiljø for programvareutvikling. I tillegg ble applikasjonene ArcMap og ArcCatalog benyttet for håndtering og tilrettelegging av noen av dataene og presentasjon av resultatene.

Tabell 2 Programvare brukt i utviklinga av løsningen:

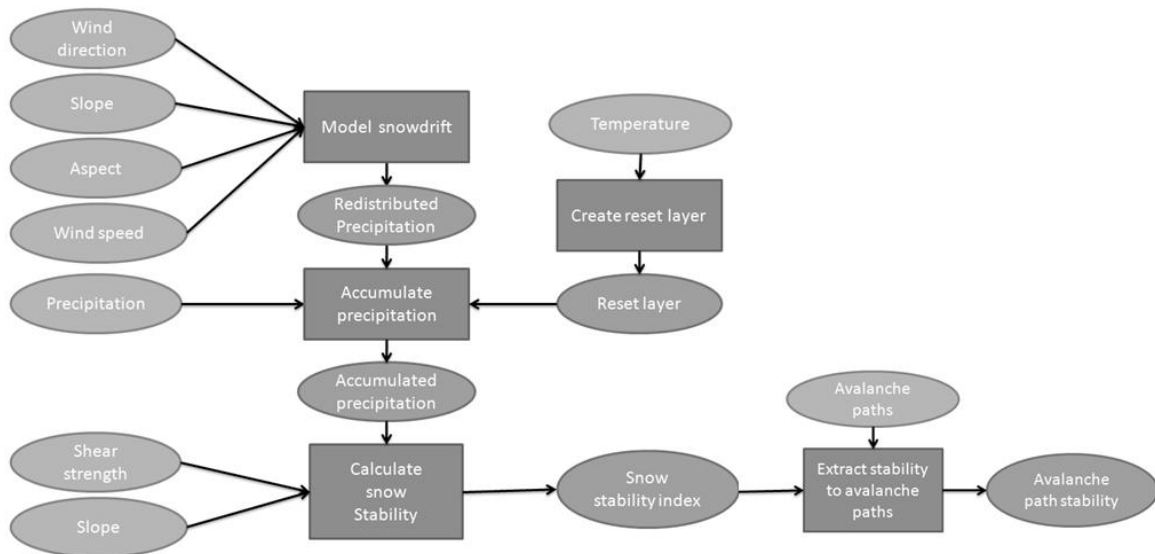
<i>Programvare (produsent)</i>	<i>Versjoner</i>	<i>Bruk</i>
ArcGIS Modelbuilder (ESRI)	9.2.0.1324	Utarbeide modeller
ArcGIS-applikasjonene ArcCatalog/ArcMap (ESRI)	9.2.0.1324	Tilrettelegging av geografiske data
Visual Studio (Microsoft)	2005 v. 2.0.50727	System og modellhåndtering

Å dele snøstabilitetsmodellen opp i mindre biter, løse hver bit, for så å slå disse sammen til en felles løsning, er en vanlig framgangsmåte for multikriterieanalyser, og er beskrevet i kapittel 2.1. Modellene i studien ble delt inn i mindre modeller, helt til hver modell kunne løses ved hjelp av enkel GIS-funksjonalitet. Delmodellene ble deretter bygget opp sekvensielt til en samlet løsning (Figur 4-5).

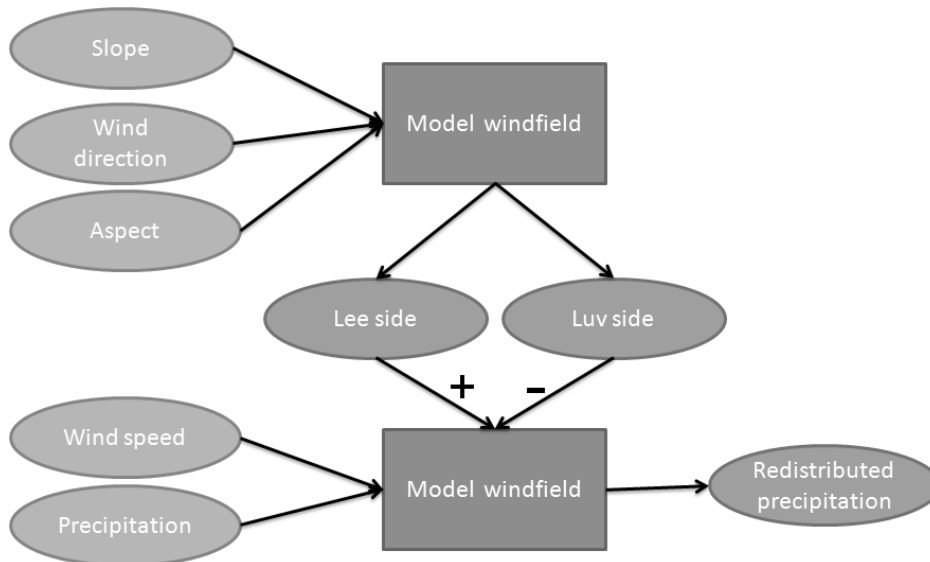


Figur 4-5 Sekvensiell over snøstabilitetsmodellen.

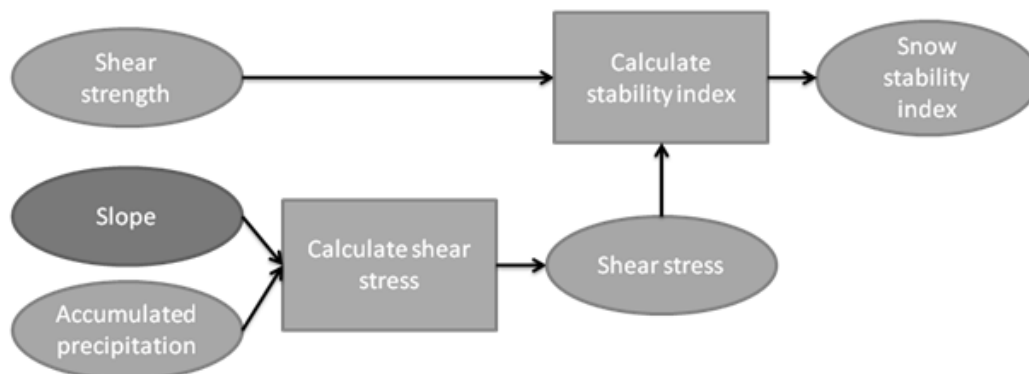
En struktur for modellene ble etablert, hvor modeller ble delt i mindre delmodeller. På øverste nivå ble det definert en konseptuell modell håndtert av applikasjonen for sammenslåing av delmodellene (Figur 4-6). På dette nivået ble også mye av dataflyten håndtert. En oversikt over alle modellene er gitt i Vedlegg A. To av de meste sentrale var snøstabilitetsmodellen (Figur 4-7) og modell for beregning av den endelige snøstabilitetsmodellen (Figur 4-8).



Figur 4-6 Oversikt over snøstabilitetsmodellen.

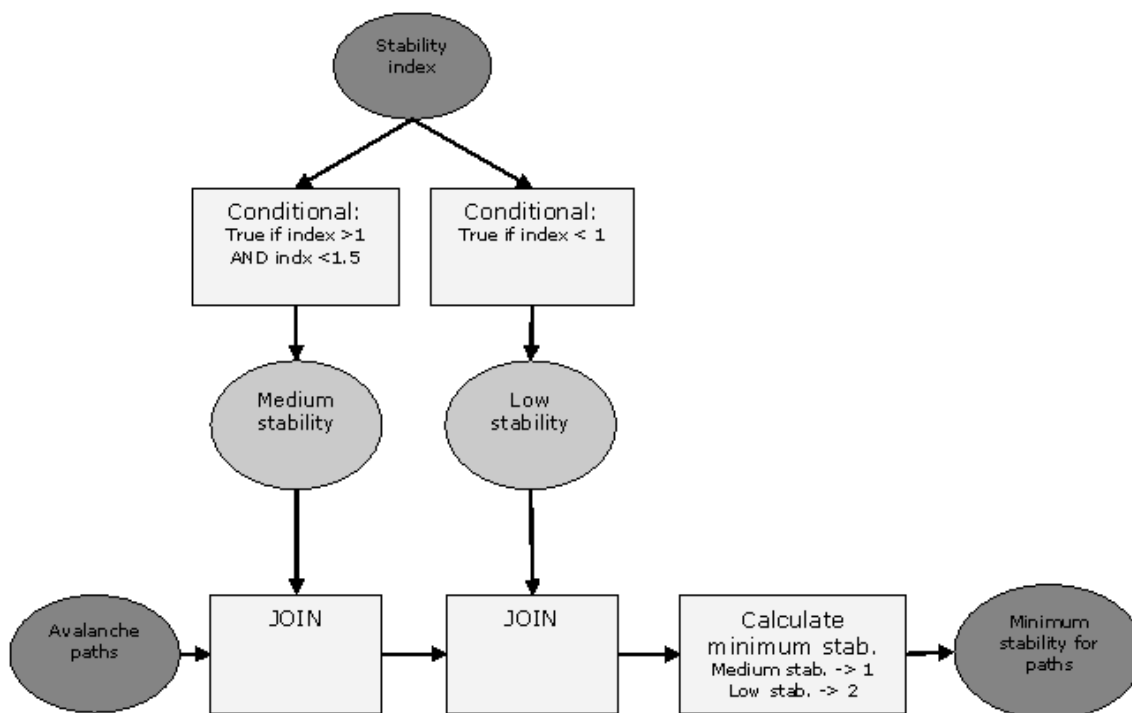


Figur 4-7 Snødriftsmodellen («Model snowdrift»).



Figur 4-8 Modell for beregning av snøstabilitet («Calculate snow stability»).

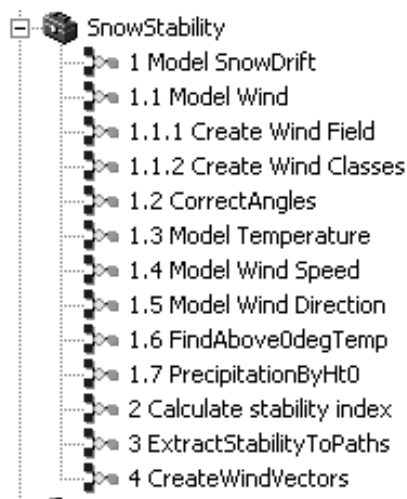
Sluttresultatet fra disse modellene var et raster for stabilitetsindeksen. For å forenkle beslutningsprosessen, ble den minste snøstabilitetsindeksen trukket ut for hver enkel skredbane. Dette ble utført ved å kopiere skredbanedatasettet, og lagre snøstabilitetsverdien i et nytt attributt i kopien av skredbanedataene. Attributtverdien ble satt til den laveste snøstabilitetsklassen for alle cellene innenfor hver av skredbanene. Dette ble utført i en egen modell som ble beregnet i etterkant av snøstabilitetsmodellen (Figur 4-9).



Figur 4-9 Prinsipp for uttrekk av minimum stabilitetsindeks til skredbane.

Hver delmodell kunne deles i mindre delmodeller, og på denne måten ble det etablert en struktur for modellene. Alle delmodellene ble samlet i ei «verktøykasse» i ModelBuilder

(Figur 4-10). Ei verktøykasse er en samling av verktøy og modeller som lagres som ei enkeltfil, og som kan gjenbrukes i andre prosjekter. Flere GIS-modeller ble kjørt direkte av applikasjonen, og ble derfor ikke inkludert i verktøykassa.



Figur 4-10 Verktøykasse med delmodeller. Utsnitt fra ArcMap.

4.2.1 Applikasjon for beslutningsstøtte

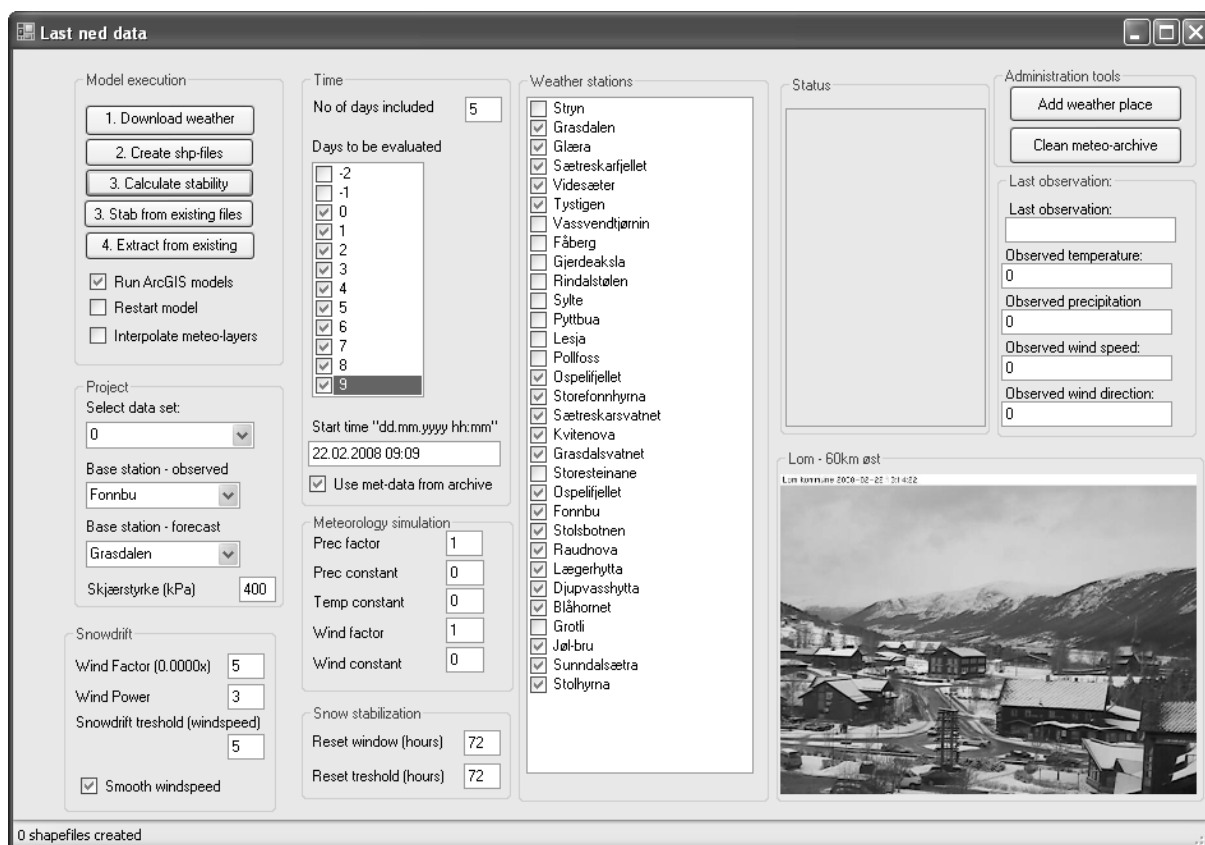
Snøstabilitetsmodellen ble implementert som en egen applikasjon i Visual Studio.

Applikasjonen behandlet alle de ulike modellene fra ArcGIS i tillegg til å håndtere flyten og lagring av dataene. Applikasjonen ble utviklet i programmeringsspråket Visual Basic Net, forkortet VB.net ved hjelp av utviklingsmiljøet Microsoft Visual Studio. Applikasjonen utnyttet språkets muligheter for objektorientert programmering blant annet ved å definere klasser (Vedlegg K). Applikasjonen ble kompilert til et kjørbart program.

Snøstabilitetsmodellen og dens delmodeller var laget i ModelBuilder, og applikasjonen aksesserte disse ved hjelp av programmeringsbiblioteket ArcObjects. I tillegg ble, som i forrige kapittel, noen standardmodeller fra ArcObjects kjørt direkte av applikasjonen uten å legges inn i egen modell i ModelBuilder først. Dette ble kun gjort for enkle modeller, for eksempel modeller for datalagring og for akkumulering av nedbør.

Applikasjonen ble strukturert ved en vanlig metode kalt «layered architecture» (Larman 2004). Lagene jobber hver for seg, og kommunikasjonen mellom lagene skjer ved at det øvre laget kaller opp en metode eller tjeneste fra lag under. «Layered architecture» gjør applikasjonen mer stabil og enklere å vedlikeholde, da logikk og struktur internt i et lag kan endres uten å ta hensyn til lagene rundt.

I applikasjonen ble det etablert to lag, et presentasjonslag og et applikasjonslag. Kommunikasjonen med brukerne ble utført i presentasjonslaget, hvor det grafiske brukergrensesnittet var hovedelementet (Figur 4-11). Dette laget var utviklet først og fremst med tanke på et best mulig testmiljø, spesielt for manuell justering av ulike parametre. Applikasjonslaget inneholdt all programlogikken, og håndterte først og fremst kjøring av modellene. Det er også vanlig med et datalag for håndtering av data, men dataflyten i modellen var enkel nok til å håndteres i applikasjonslaget.



Figur 4-11 Snøstabilitetsapplikasjonens brukergrensesnitt

Behovet for regelmessige analyser krevde at applikasjonen ble satt opp til å kjøres automatisk. Applikasjonen ble dermed satt opp som en planlagt oppgave i Windows (eng. «scheduled task»). Denne ble satt opp til å kjøre fire ganger i døgnet i testperioden: kl 03:00, 09:00, 15:00 og 21:00. En liten komponent, kalt «modMain», ble inkludert i applikasjonens klassestruktur for at applikasjonen kunne kjøres uten å starte brukergrensesnittet. Modulen hadde ferdigdefinerte verdier for alle parametrene som behøvdes.

I tillegg hadde applikasjonen muligheter for å simulere og justere meteorologiske verdier. En konstant kunne legges til nedbør, vindhastighet og temperatur for å endre disse med en fast mengde. Nedbør og vindhastighet kunne også ganges med en multiplikasjonsfaktor. Dette var spesielt viktig for simulering av resultater ved temperaturer over 0 og for å teste snødriftsmodellen.

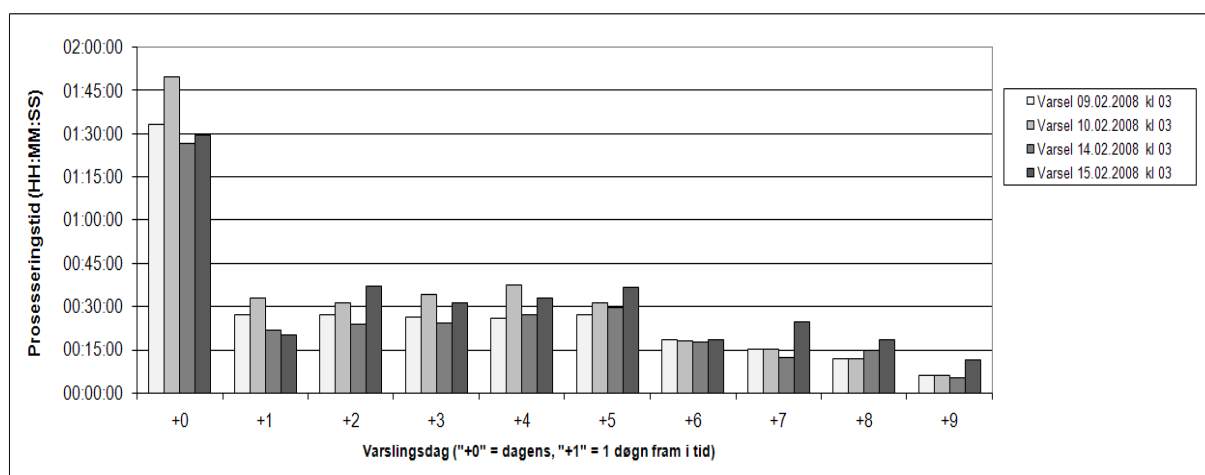
En annen simuleringsmulighet var å kjøre applikasjonen uten å håndtere romlige data, det vil si at GIS-funksjonalitet ble ekskludert. I stedet for romlige resultatfiler, ble tomme filer opprettet. Dette ble gjort for å verifisere og teste programmeringslogikken. Blant annet ble det brukt for å lete etter logiske feil i applikasjonen og etter redundante modellkjøringer.

4.2.2 Ytelse og lagring

Applikasjonen var enkel å kjøre og krevde få maskinressurser. Derimot var tida det tok å utføre analysene, analysetida, opp til flere timer for en full 10-dagers prognose.

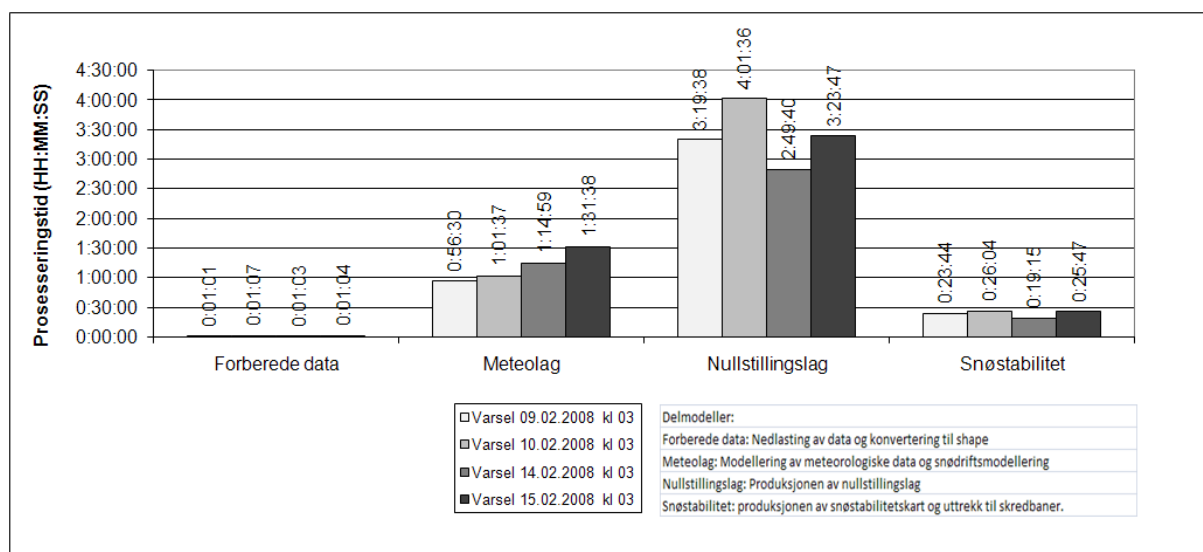
Applikasjonen gikk i ei løkke, med en rotasjon for hver prognosedøgn.

For å redusere tida gjenbrukte derfor modellen tidligere genererte filer. For den første varslingsdagen, måtte alle filene lages, og denne fikk dermed lengst analysetid (Figur 4-12). For de påfølgende dagene eksisterte noen av filene fra før, og gjenbruk førte da til kortere analysetid. For de siste fire varslingsdagene eksisterte det kun et varsel pr dag, og analysetida for disse var dermed vesentlig lavere.



Figur 4-12 Analysetida fordelt på prognoser (varslingsdag) for 4 ulike kjøringer.

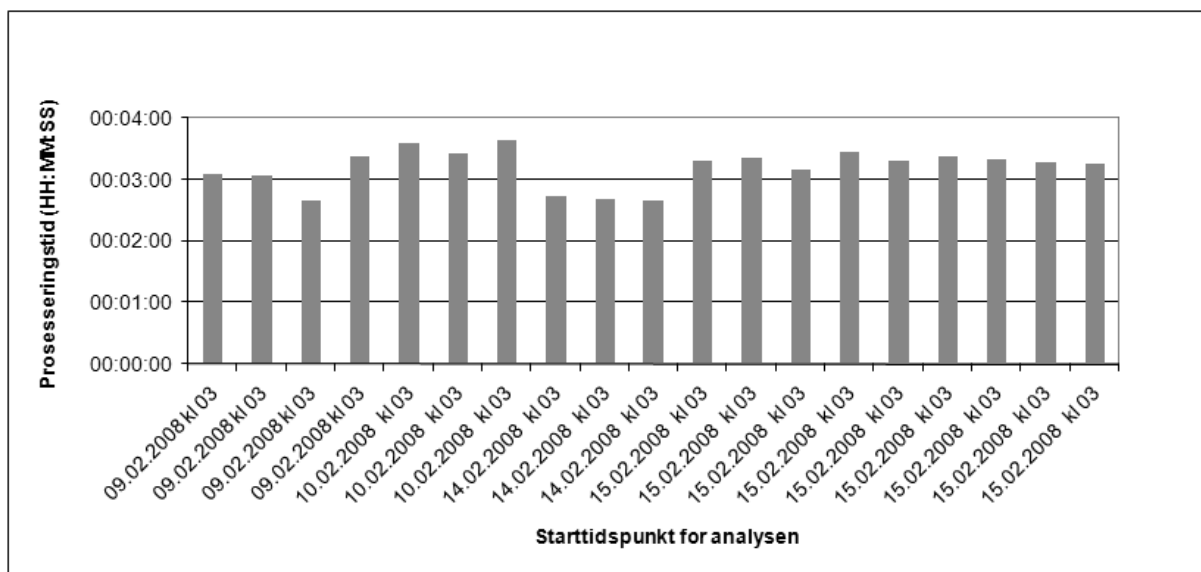
Analyssetida var ujevnt fordelt mellom ulike delprosesser. Figur 4-13 viser analyssetida fordelt på fire ulike delmodeller. «Forberede data» inkluderte nedlasting av data og konvertering til shape-format, «meteolag» besto av modellering av meteorologiske data og snødriftsmodellering for estimering av snødrift. «Nullstillingslag» var produksjonen av nullstillingslag, mens «snøstabilitet» var produksjonen av snøstabilitetskart og uttrekk til skredbaner. Tallene var basert på tidsdata i applikasjonens loggfiler, og alle varslene ble kjørt automatisk.



Figur 4-13 Analyssetida fordelt på delprosess.

Snødriftsmodellen og nullstillingsmodellen var to av de delprosessene som var mest avgjørende for analyssetida. Snødriftsmodellen ble bare kjørt for tidsperioder med vindhastighet over 5 m/s, og antallet kjøringar for hver analyse kunne derfor variere (Figur 4-14).

Nullstillingsmodellen ble derimot kjørt for hver prognosedøgn. Variasjonen i antall kjøringar av snødriftsmodellen kunne påvirke det totale tidsforbruket betydelig, i og med at hver kjøring av snødriftsmodellen i gjennomsnitt tok 3 minutt og 12 sekunder



Figur 4-14 Eksempler på analysetider for snødriftsmodellen.

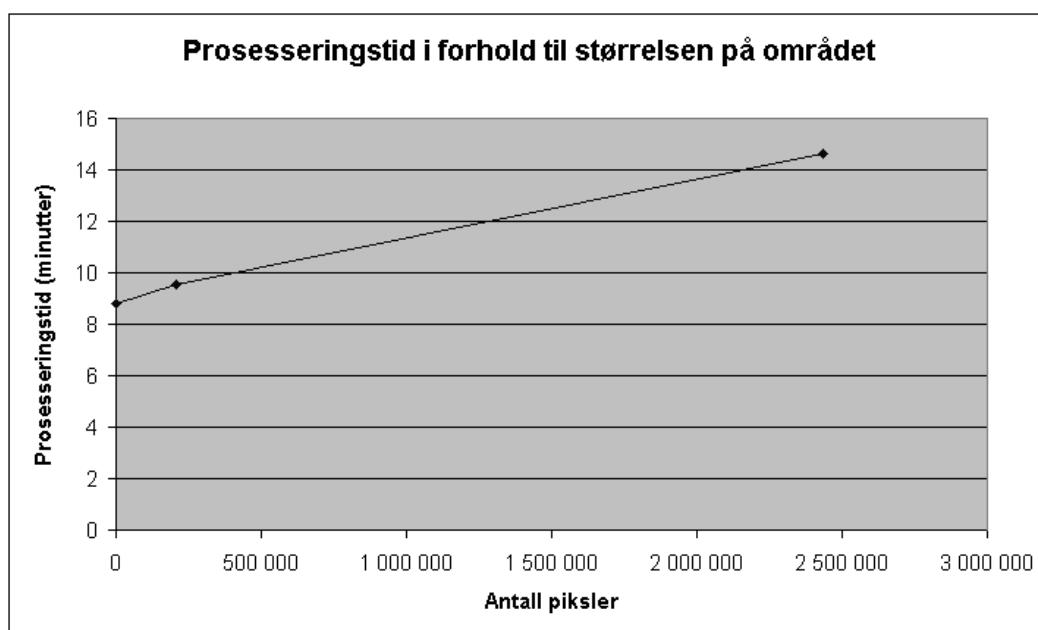
Det ble antatt at analysetid avhang av størrelsen på datasettene. Derfor ble modellen testet med fire utsnitt av studieområdet (Tabell 3). Tre av områdene hadde verdier for alle cellene, men størrelsen på utsnittet varierte fra hele studieområdet til en enkel skredbane. Det siste utsnittet var et utsnitt av skredbanene, men hadde tomme celleverdier for pikslene som ikke dekker skredbanene.

<i>Utsnitt</i>	<i>Størrelse (piksler)</i>	<i>Antall celler. Antall tomme celler i parentes.</i>	<i>Analysetid (gjennomsnitt) HH:MM:SS</i>	<i>Analysetid for snødrift (gjennomsnitt) HH:MM:SS</i>
Område 1 - Fullstendig område	1749 x 1393	2436357 (0)	00:14:37	00:02:28
Område 2 - Dekningsområdet til skredbanene	420 x 488	204960 (0)	00:09:34	00:01:35
Område 3 - En enkel skredbane	48 x 50	2400 (0)	00:08:47	00:01:16
Område 4 - Kun skredbaner	473 x 473	223729 (41303)	00:10:48	00:01:50

Tabell 3 Analysetider for snøstabilitetsmodellen for fire ulike utsnitt.

For område 2, som var et utsnitt som kun dekket skredbanene, var analysetid bare 1/3 av analysetida til område 1. Område 3 dekket kun en enkel skredbane, og dette området hadde den korteste analysetida. Område 4 var av omtrent samme størrelse som område 2, men celler utenfor skredbanene hadde ingen verdi (verdien «NoData» i ArcGIS). Til tross for de tomme cellene, ble analysetida noe større enn for område 2.

Selv om antallet utsnitt var lite, kan resultatene tyde på at analysetida var avhengig av antall piksler i området (Figur 4-15). Minimum analysetid var i overkant av 8 minutter, og økningen var omtrent 2 minutter per 1 million celler.



Figur 4-15 Analysetid i forhold til områdets størrelse i piksler

For å minimere at PC-ens ytelse skulle påvirke analysetida, ble modellene kjørt flere ganger for hvert av områdene i perioder uten annen prosessering. De to raskeste resultatene for hvert område ble antatt å være minst påvirket av PC-ens minne- og ressursbruk, og derfor brukt i analysene. Samtidig ble alle modellene kjørt for samme tidsperiode og med samme meteorologiske data.

Utenom effektiv analysetid var strukturert lagring et annet mål for datahåndtering.

Applikasjonen sørget for at alle resultatene fra modellene ble lagret på disk. En del datasett ble kun lagret midlertidig, og ble slettet ved neste kjøring av modellen. De permanente filene

ble lagret permanent i en egen diskkatalog. Antallet datasett som applikasjonen produserte kunne variere, og var blant annet avhengig av antall ganger snødriftsmodellen ble kjørt.

Stabilitetsmodellen som ble kjørt 15. februar 2008 kl 03:00 produserte 30 permanente datasett og 767 midlertidige datasett. Da hvert datasett besto av flere filer, ble det totalt produsert 145 varige filer og 4621 midlertidige filer. Flesteparten av datasettene var rasterdata, kun 49 midlertidige og 10 permanente datasett var vektordata. De varige datasettene tok i alt opp 216 MB diskplass, mens de midlertidige filene krevde 4,9 GB diskplass. I tillegg ble det manuelt produsert kart (1,5 MB) og animasjon (5 MB) i etterkant av kjøringa.

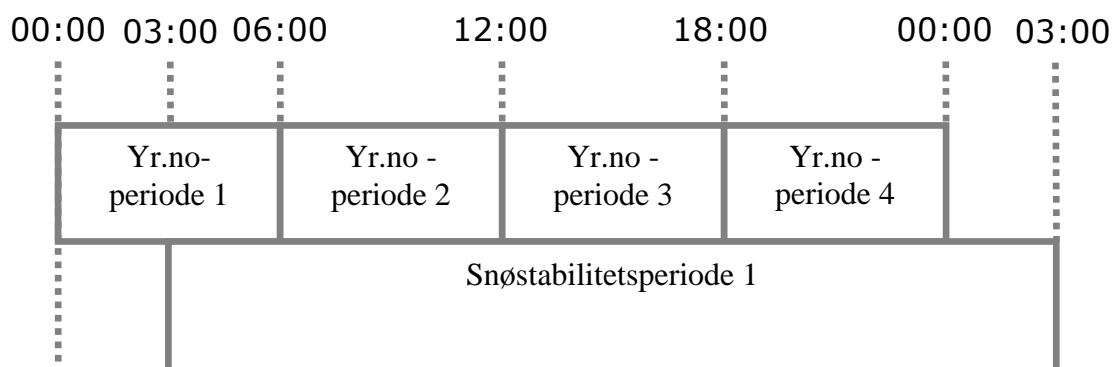
Håndteringa av data i applikasjonen ble sikret ved en kombinasjon av nedlasting, konvertering mellom formater og kopiering og flytting av enkeltfiler. Inndataene som ble brukt i modellene var av forskjellig struktur, format og kvalitet. For å sette disse sammen, var det nødvendig å konvertere alle dataene til formater som kunne brukes av GIS-komponentene. Alle vektordataene ble tilrettelagt i shape-format, mens for billedata ble det laget tiff-filer eller rasterfiler i andre formater. Alle operasjonene for tilrettelegging og håndtering av data ble utført av standardkomponenter i Visual Basic og ArcGIS.

En utfordring ved applikasjonen var ustabilitet. Flere av analysene feilet før de var fullført. Analysene ble satt opp til å kjøres fire ganger daglig (kl 03, 09, 15 og 21), og kun kjøringa klokka 03 viste seg som stabil, trolig på grunn av lite annen aktivitet på PC og på nettverket i denne perioden. Applikasjonen loggførte resultatene av alle modellkjøringene, og i tillegg ble andre hendelser registrert. Dette fungerte som dokumentasjon på kjøringa, og ble gjennomgått før resultatene kunne brukes. En gjennomgang av loggfilene avdekket for eksempel manglende nedbørsobservasjoner 18. februar, noe som skapte feil i den estimerte snøstabilitetsindeksen. Det fantes også muligheter for loggføring i ModelBuilder, men denne ble ikke utnyttet i studien. Utenom loggfilene ble ingen metadata registrert av applikasjonen eller modellene.

4.2.3 Presentasjon av resultater

Snøstabilitetsmodellen produserte resultater for de påfølgende 10 dager, selv om dette kunne justeres i applikasjonen. Lengden på prognosene var lik lengden på prognosene fra yr.no, men

yr.no inkluderte mellom en og fire prognoser per dag i stedet for snøstabilitetsmodellens ene (Figur 4-16).



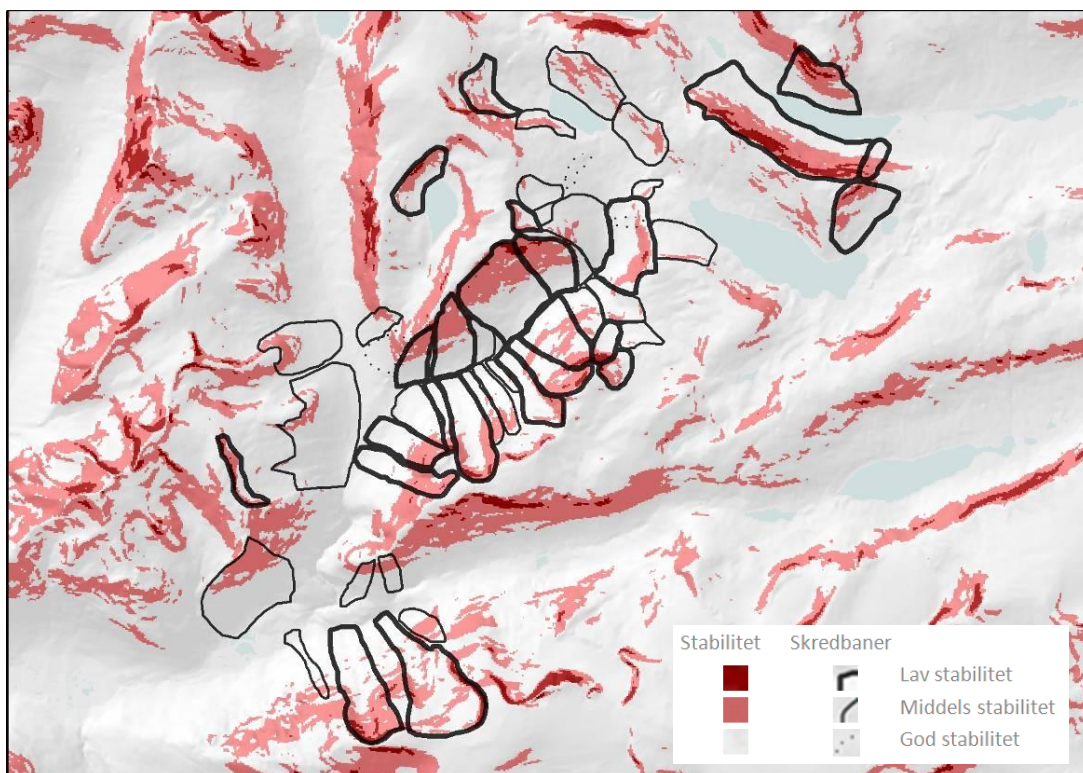
Figur 4-16 Forholdet mellom de 4 daglige tidsperiodene for yr.no og den daglige prognosen for snøstabilitetsmodellen.

Den valgte formelen for snøstabilitet produserte indeksverdier. I stedet for å bruke vektete verdier basert på klassifisering av hver enkel faktor, ble det produsert et rasterdatasett med indeksverdien som celleverdi. Dette rasterdatasettet ble brukt til å trekke ut stabiliteten til skredbanene. To av skredbanene i studieområdet hadde feil i attributtverdien for ID-feltet. Dette gjaldt «Oppljostunnel W» og «Grasdalsstunnel W». Stabilitetsindeksen kunne av den grunn ikke beregnes for disse banene.

Uttrekket av stabiliteten til skredbanene medførte en klassifisering. En klassifisering som blant annet tidligere brukt i studien av Lehning et al. (2004) for beregning stabilitetsindeksen ved hjelp av SNOWPACK ble valgt. I den studien indikerte verdier under 1 ustabilitet og over 1,5 indikerte stabilitet. Det ble derfor definert 3 klasser i vår studie:

- Snøstabilitet mindre enn 1: Lite stabilt snødekke
- Snøstabilitet mellom 1 og 1,5: Middels stabilt snødekke
- Snøstabilitet over 1,5: Stabilt snødekke.

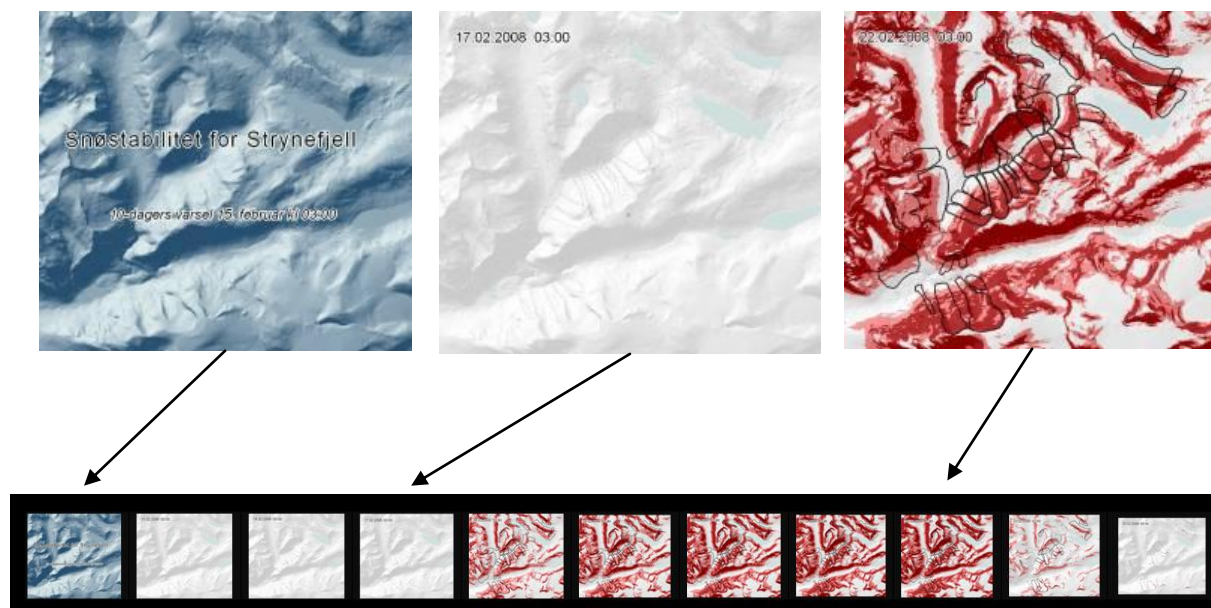
Snøstabilitetskart var hovedresultatene fra snøstabilitetsmodellen. Kartet besto av snøstabilitetsrasteret og skredbanene symbolisert i henhold til en mal (Figur 4-17). Basert på celleverdiene ble rasterdataene gruppert og symbolisert i henhold til de samme tre klassene.



Figur 4-17 Eksempel på snøstabilitetskart: Prognose for 26.02.2008 som varslet 16.02.2008.

I tillegg til kartene, ble det produsert animasjoner for noen av modellresultatene ved hjelp av «Animation»-verktøyene i ArcMap (Figur 4-18 og Vedlegg M). Det ble laget animasjoner av:

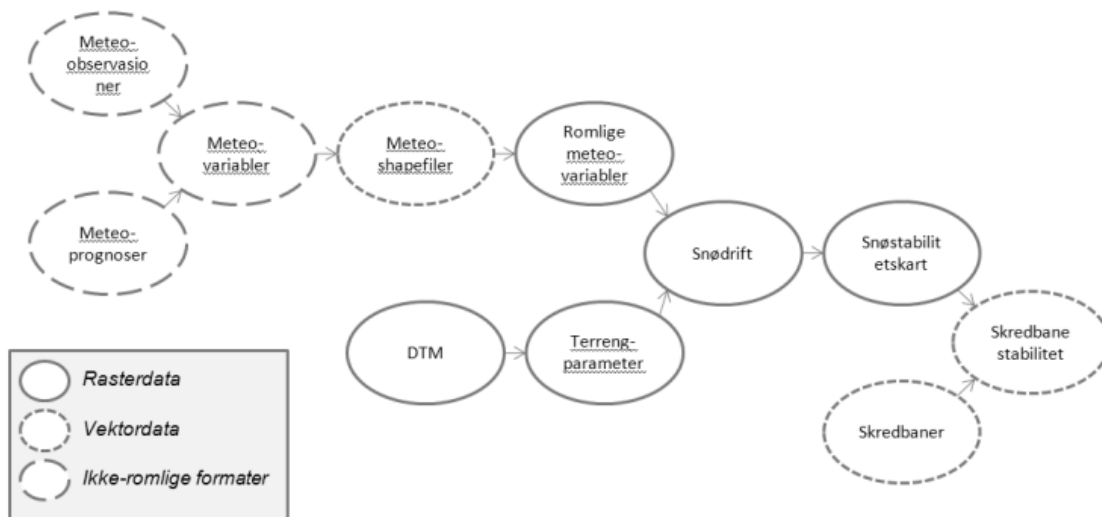
- Snøstabilitetskartene for å vise utviklinga i snøstabiliteten i løpet av perioden
- Snødriften og vindfeltet for å vise snødrift i forhold til vindretning
- Temperatur delt inn i pluss- og minusgrader for å vise variasjonen i løpet av perioden.



Figur 4-18 Utsnitt av animasjon laget 15.02.2008. Nederste stripe viser alle klippene som utgjør videoen

4.3 Tilrettelegging av data

Datagrunnlaget måtte bearbeides før det kunne brukes i snødriftsmodellen. Som for andre eksempler innen multikriterieanalyser vist i kapittel 2.2, var datagrunnlaget heterogent og krevde en veldefinert dataflyt for å få til effektive analyser. Det ble derfor etablert en dataflyt som ivaretok tilrettelegginga og kalibrering av data til bruk i snøstabilitetsmodellen (Figur 4-19).



Figur 4-19 Dataflyt i applikasjonen.

Oppdaterte prognoser fra yr.no ble først lastet til en midlertidig disk ved hjelp av standardiserte importrutiner for XML i Visual Basic. Prognoser fra flere posisjoner kunne lastes ned samtidig. Selv om det i denne implementasjonen kun ble brukt prognoser fra ett punkt, ville det være mulig å utvide modellen til å kjøre analysene basert på data fra flere posisjoner samtidig. I studieperioden ble prognoser fra flere posisjoner lastet ned for testing og analyser. Dette ble gjort ved å definere punktene i ei fil som ble lagt i en bestemt katalog. Eksempel på definisjonsfila er gitt i Vedlegg J. Observasjonsdata fra fonnbu.no var tilgjengelig som strukturerte tekstfiler, og ble lastet ned ved hjelp av en metode i applikasjonen spesielt utviklet for dette formålet. Applikasjonen krevde også ei definisjonsfil for observasjonspunktet, eksempel på denne vises også i Vedlegg J.

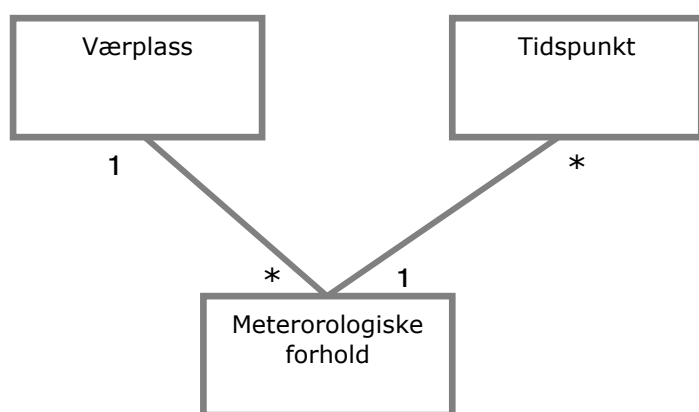
Både observasjonsdataene og prognosene ble konvertert til «shape»-format, et vektorformat utviklet av ESRI. Shapefilene ble laget ved hjelp av bruk av standardverktøy i ArcObjects.

Konvertering til shapefiler inkluderte også en endring av dataenes inndeling. Originalt representerte hver datafil data for alle tidsperiodene for en enkeltposisjon, mens shapefilene inneholdt data for alle posisjonene for et enkelt tidspunkt (Figur 4-20). Samtidig med konverteringa, ble både de nedlastede datafilene og shapefilene arkivert på disk.

Sted\tid	+0h	+6h	+12h	+18h
Grasdalen				
Raunova				
Videsæter				
Stolhyrna				

Figur 4-20 Forenklet eksempel på omstrukturering av meteorologiske data. Celler med vertikale striper viser ei originalfil, mens celler med horisontale striper viser ei omstrukturert shapefil.

For å sikre en enkel behandling av meteorologiske data, ble det valgt å legge både prognoser og observasjoner inn i en felles datastruktur (Figur 4-21). Datastrukturen var en logisk struktur i datamaskinens minne som ble håndtert av applikasjonen.



Figur 4-21 Datastruktur for meteorologiske variabler.

Mens de meteorologiske dataene var dynamiske, var terrengparametrene statiske og kunne tilrettelegges på forhånd. Helning, både vinkel- og prosentverdi, og helningsretning ble dermed utarbeidet på forhånd ved hjelp av verktøy i «Spatial Analyst»-utvidelsen av ArcMap. Den landsdekkende terrengmodellen var delt inn i rektangulære områder. To av delene måtte til for å dekke studieområdet, og disse to ble satt sammen til en enkel terrengmodellfil i

«Mosaic»-verktøyet i ArcGIS. Terrengmodellens originale oppløsning og koordinatsystem ble beholdt.

En av de største utfordringene i tilretteliggelse av data var forskjellene i datasettenes natur og oppløsning. Mens høydemodellen var et rasterdatasett med en oppløsning på 25 meter, var de meteorologiske dataene punktdata. For observasjonene eksisterte kun ett punkt. Prognosene var punktdata, men baserte seg på rasterdata fra en værmodell med 8-kilometer oppløsning. Verdiene kunne dermed hentes ut for et punkt i hver 8-kilometers celle, og rasterdata kunne produseres fra disse ved hjelp av interpolasjon. Vi så tidligere at det var mulig å laste inn prognoser for flere punkter, men i praksis ble bare dataene for ett punkt brukt i studieperioden.

Datasettene måtte dermed konverteres til rasterdata med en felles oppløsning. Selv om prognosenes oppløsning kunne blitt brukt, ville oppløsningen vært for dårlig i forhold til studiens mål om å vise detaljert informasjon om stabiliteten. Dermed var terrengmodellen det eneste av disse datasettene som oppfylte kravene til detaljgrad, og dens oppløsning ble dermed valgt som felles oppløsning. De meteorologiske dataene måtte dermed konverteres til rasterdata med 25 meters oppløsning, det vil si med høyere detaljgrad enn originaldataene. Som vi så i kapittel 2.6, er en tilsvarende problemstilling beskrevet i en studie av Skaugen (2002). Samtidig ble UTM sone 32 valgt som felles koordinatsystem.

Den temporale oppløsningen på de meteorologiske dataene måtte også defineres. Observasjonene eksisterte for hvert 10. minutt, mens prognosene ble utarbeidet for hver 6. Time – for de fjerneste prognosene hver 24. time. Selv om applikasjonen tillot ulik temporal oppløsning, ble det for analysene og analysetidas del definert en felles temporal oppløsning på 6 timer.

4.3.1 Modellering av meteorologiske variabler

Vi har sett at de meteorologiske dataene ble innhentet som punktinformasjon. Raster var imidlertid valgt som felles datatype i analysene, og den romlige oppløsning på datasettene skulle være 25 meter. Det var derfor nødvendig å modellere deres romlige variasjon for

studieområdet som et raster med 25 meters oppløsning. Vi skal se nærmere på hvordan modelleringa ble gjort for de fire meteorologiske variablene som ble benyttet i studien.

Som vi har sett i feltbeskrivelsen, er nedbøren den viktigste faktoren for snøskredaktiviteten i studieområdet (Kronholm et al. 2006). Nedbøren kan variere stort i fjellterreng som Strynefjellet, men først og fremst er den avhengig av høyde. Nedbøren antas å øke med 5 - 10 % per 100 meter høydestigning i Skandinavia (Killingtveit et al. 2003). I studien ble det antatt en økning på 7,5 % per 100 meter. Dermed ble følgende formel utarbeidet i verktøyet «Single output map algebra» i ArcToolbox for å estimere nedbøren:

$$prec_A [prec_0] * POW(1 + f_{height}, ((h_A - h_0) / 100)) \text{ (Formel 4)}$$

hvor $prec_0$ = nedbør i mm for valgt posisjon; $prec_A$ = nedbør i mm på ønsket posisjon, h_x = høyde i meter over havet for ønsket punkt, h_0 = høyde i meter over havet for prognosepunkt eller værstasjon. f_{height} er nedbørsgradienten, det vil si 0,075 i denne studien.

I utgangspunktet var vi for studieområdet kun interessert i den siste tids nedbør, da snøskred i studieområdet først og fremst blir utløst i perioder med intensiv nedbør. Derfor inkluderte analysene modellen kun den akkumulerte nedbøren for de fem foregående dagene. Akkumuleringa ble gjort ved å summere nedbøren for hele denne perioden ved hjelp av ArcGIS-verktøyet "Plus".

Kronholm et al. (2006) fant også en avhengighet mellom temperatur og skred, selv om den var mer sammensatt. Temperaturen avgjør hvorvidt nedbøren kommer som snø eller regn, i tillegg til at høye temperaturer kan bidra til stabilisering av snølaget. Ved økende høyde synker temperaturen med en viss faktor, «temperaturgradienten». Modellen benyttet en temperaturgradient på 0,67 °C pr 100 meter stigning. Dette ble implementert i ArcToolbox-verktøyet «Single output map algebra» ved hjelp av følgende formel:

$$T_A = T_0 - (0.67 * (h_A - h_0) / 100) \text{ (Formel 5)}$$

hvor T_0 = lufttemperatur i °C og h_0 = høyde i moh. for prognosepunktet eller værstasjonen. T_A = lufttemperatur i °C og h_x = høyde i moh. for ønsket punkt.

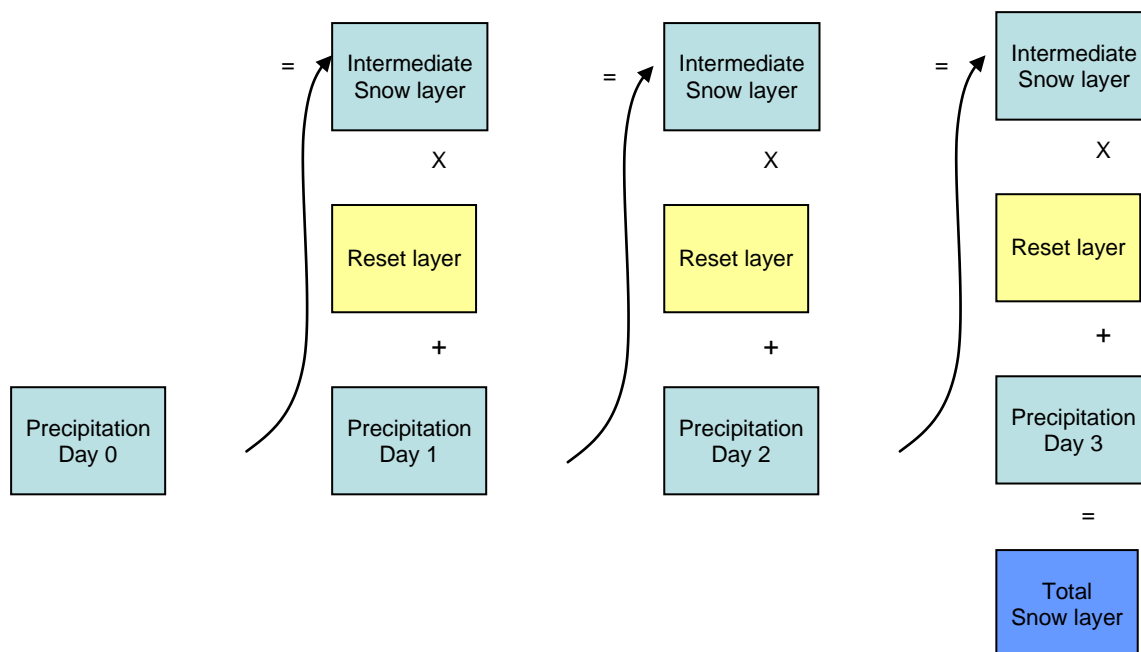
Modellen tar ikke hensyn til temperaturinversjon. Dette fenomenet gjør at temperaturen i dalbunnen er lavere enn på fjelltoppene rundt, og oppstår flere ganger i løpet av vinteren. Dette er et fenomen som er vanskelig å forutse, og for observasjoner kreves det værstasjoner både i dalbunnen og på fjelltoppen (Barry 1992).

Vindretning og vindhastighet ble holdt konstant for området, selv om begge kan variere kraftig i fjellterreng (Barry 1992). Dermed antok modellen at de meteorologiske variablene enten var konstante eller kun avhengig av høyde. Andre faktorer kunne likevel også ha spilt inn. For eksempel hadde nedbørsmengden en minkende trend i retning øst i studieområdet. Applikasjonen inneholdt muligheter for å interpolere prognosene hvis flere prognosepunkter var blitt lastet ned. Det ble utført forsøk for å modellere den romlige variasjonen i de meteorologiske variablene ved hjelp av interpolasjonsmetoder, og resultatene tydet på en romlig avhengighet for variablene, men videre undersøkelser måtte til for å bekrefte dette.

4.3.2 Modellering av temperaturavhengig stabilisering

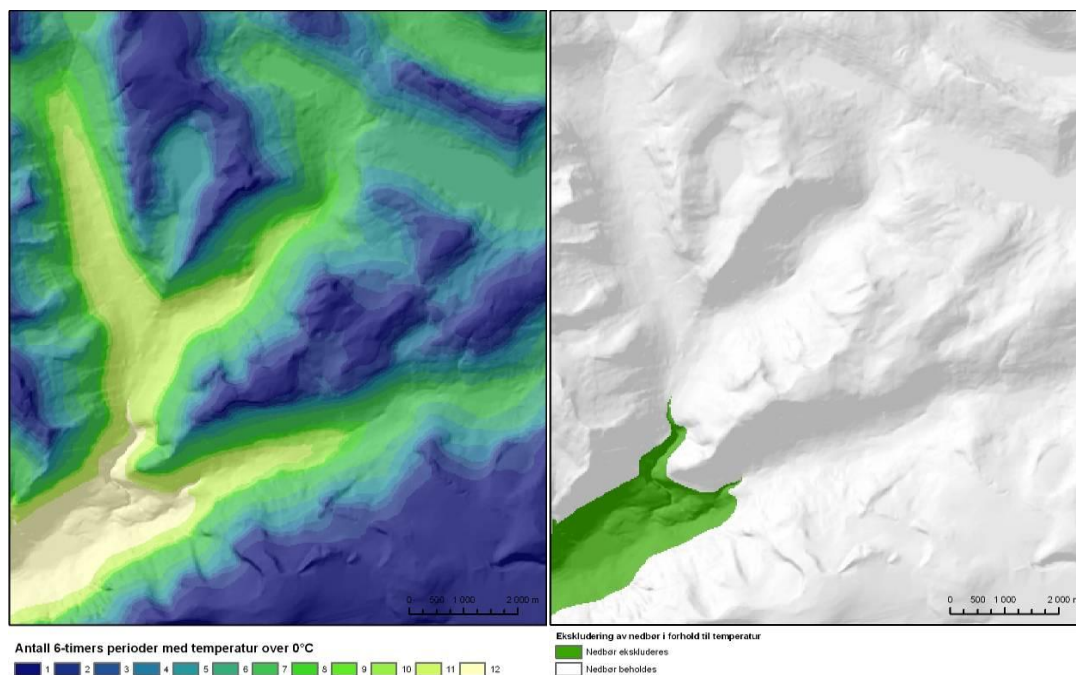
Basert på studien fra Kronholm et al. (2006) som viste at høye temperaturer kunne føre til stabilisering av snøen, ble det laget en forenklet modell for temperaturavhengig stabilisering. Det ble antatt at snøen stabiliserte seg etter tre sammenhengende dager med temperaturer over 0 °C. Dette ble utført ved å sette den akkumulerte nedbørsverdien for perioden til null.

En modell ble utviklet for å nullstille nedbøren (Figur 4-22). Framgangsmåten var å først lage et nytt binært rasterdatasett for hver 6-timersperiode kalt «Above 0 layer». Dette datasettet inneholdt verdien «1» for cellene der temperaturen var over 0 °C, og «0» der temperaturen var under 0 °C. For hvert analysetidspunkt ble «Above 0 layer»-datasettene for de tre siste dagene summert i et nytt datasett, «Reset layer». Hvis verdien av «Reset layer» for ei celle var lik summen av tidsperioder i tredagersperioden, ble «Reset layer» satt til «0», ellers «1». Dermed representerte «Reset layer» alle cellene som hadde hatt plussgrader de siste tre dagene. Den akkumulerte nedbøren ble ganget med Reset layer, slik at celler innenfor «Reset layer» fikk nullstilt nedbøren. Applikasjonen inneholdt også en parameter som kunne settes slik at modellen tillot nullstilling selv om temperaturen var under 0°C i et visst antall tidsperioder.



Figur 4-22 Eksempel på nullstilling av akkumulert nedbør.

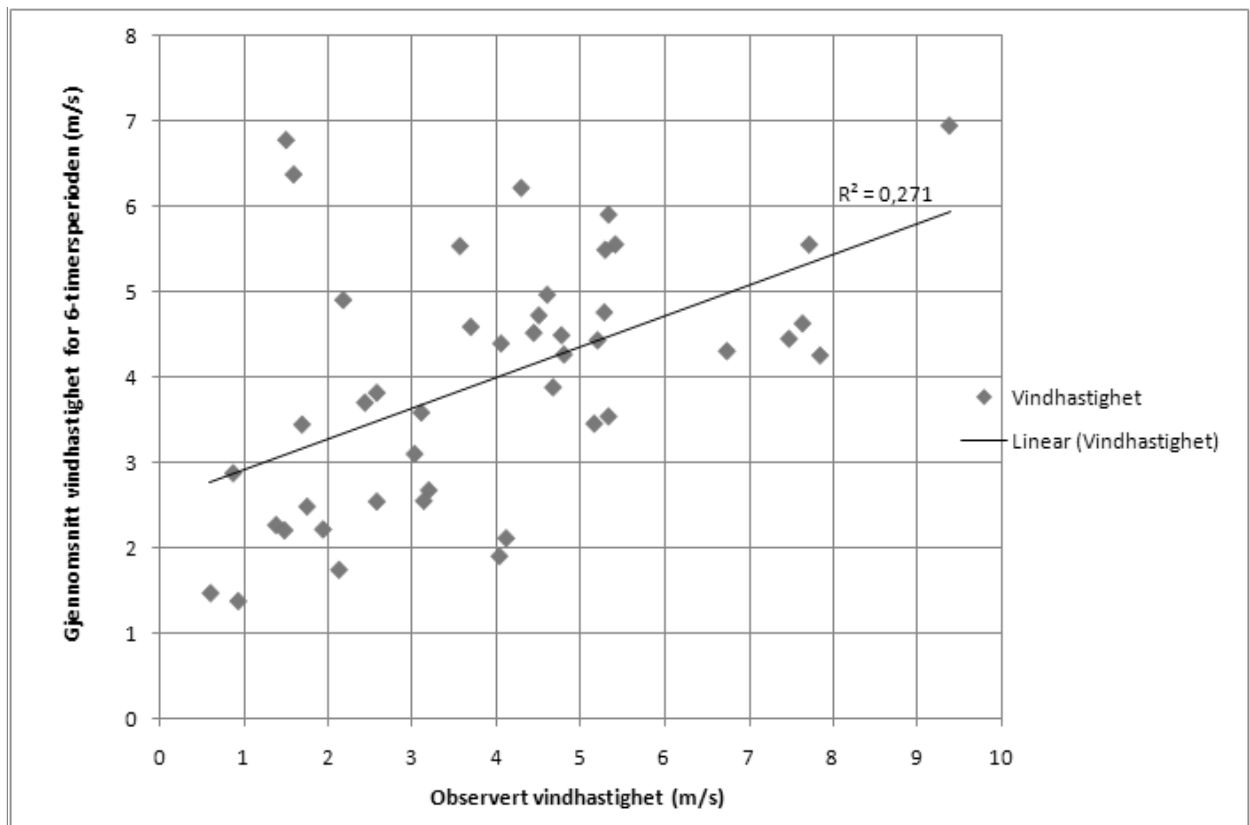
I studieperioden opplevde ingen celler innenfor studieområdet tre sammenhengende dager med plussgrader. Modellen ble i stedet kjørt med simulerte verdier for temperaturen, og resultater viste som forventet nullstilling av de lavereliggende områdene (Figur 4-23). Dette medførte at den akkumulerte nedbøren, som forventet, ble nullstilt for lavereliggende områder. Et midlertidig raster viste antall 6-timersperioder over 0 °C for de tre foregående dagen, og dette dannet basis for det endelige nullstillingslaget.



Figur 4-23 Antall perioder med temperatur over 0 °C (venstre) og nullstillingslaget (høyre). Simulerte resultater.

4.3.3 Midling av vindhastighet

Vindhastigheten ble midlet ved å beregne gjennomsnittet av alle observasjonene de siste 6-timene. Figur 4-24 viser resultatet av denne prosessen for en testperiode. Som med prognosene, ble observasjonene lagt inn i den felles datamodellen som applikasjonen håndterte.



Figur 4-24 Midling av vindhastighet. Gjennomsnittlig vindhastighet mot observert vindhastighet 18.1.2008 – 29.1.2008.

4.3.4 Snødriftsmodell og vindfeltsmodellering

Snødrift kan føre til at snøen gjendistribueres, og fører til opphoping som reduserer stabiliteten i visse områder. Snødriften påvirkes sterkt av lokal topografi, og distribusjonen kan dermed ha store lokale variasjoner. Generelt er lesiden av fjell er spesielt utsatt for opphoping av snø i snøskavler og snøfonner. I kapittel 2.4 så vi at flere studier har forsøkt å estimere snødriften ved numeriske modeller, men det er fortsatt vanskelig å oppnå gode resultater. Snødriften ble derfor beregnet i studien ved hjelp av en enkel snødriftsmodell.

Terskelverdien for vindhastighet før snødrift oppstår varierer, men noen egenskaper til snødrift er kjente (Jaedicke 2001):

- Terskelverdien for vindhastigheten øker ved høyere temperatur, høyere luftfuktighet og hvis det skjer avsetning av snø samtidig
- Terskelverdien øker med tida, men økningen går saktere ved lav temperatur
- Vindhastigheten som er nødvendig for å opprettholde snødrift er mindre enn terskelverdien for å sette i gang snødriften.
- Snødriften forventes å øke med omtrent tredjepotens av vindhastigheten (Jaedicke 2001).

I modellen ble terskelverdien for enkelhets skyld satt til 5 m/s, og snødriften ble bare beregnet for tidsperioder der vindhastigheten var høyere.

For beregning av le- og loside og graden av forflytning, må vindvariasjonen i landskapet modelleres. I denne studien skal vi bruke følgende formel, basert på arbeid av Ryan (1977) og beskrevet i Stocker-Mittaz (2001), som beregner avbøyning av vindretning i forhold til topografi:

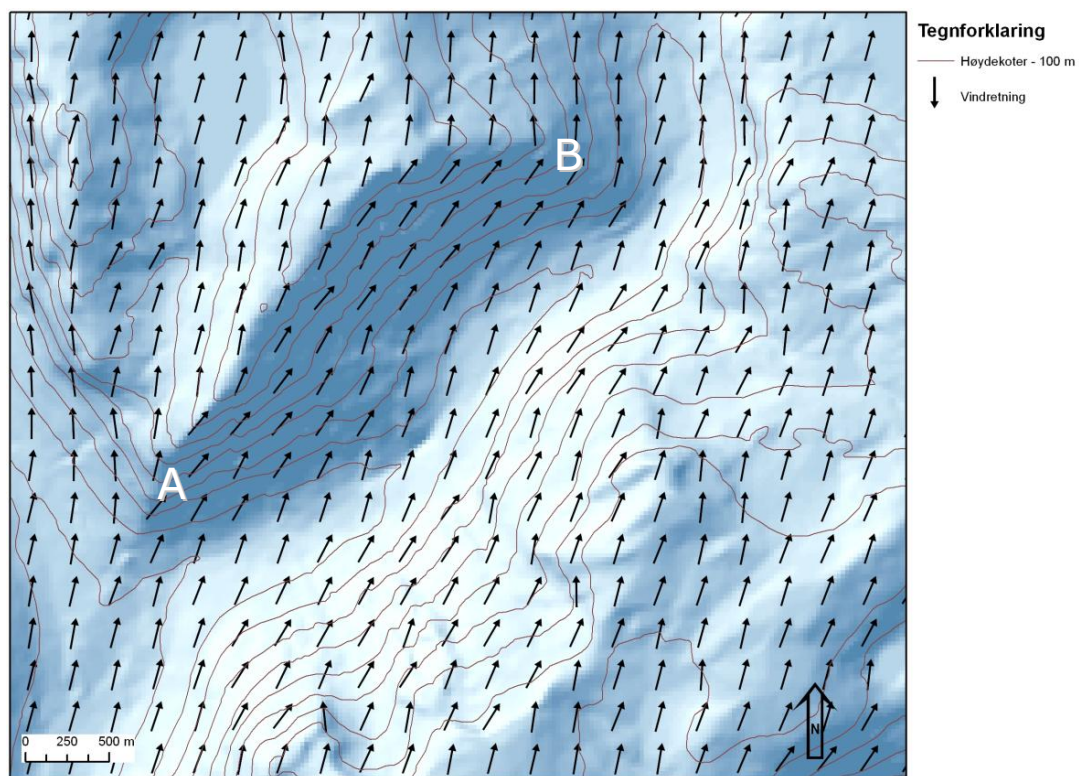
$$Fd = - 0,255 s_d \sin(2 (A - \theta)) \text{ (Formel 6)}$$

hvor F_d = vinddiversjon, s_d = helning i %, A = helningsretning i grader og θ = vindretning i grader. Vindretning for hver celle i studieområdet, også kalt vindfeltet, ble beregnet ut fra den generelle vindretningen i området kombinert med cellenes helning og helningsretning. Nabocellenes egenskaper eller endring av vind i disse påvirker ikke resultatet.

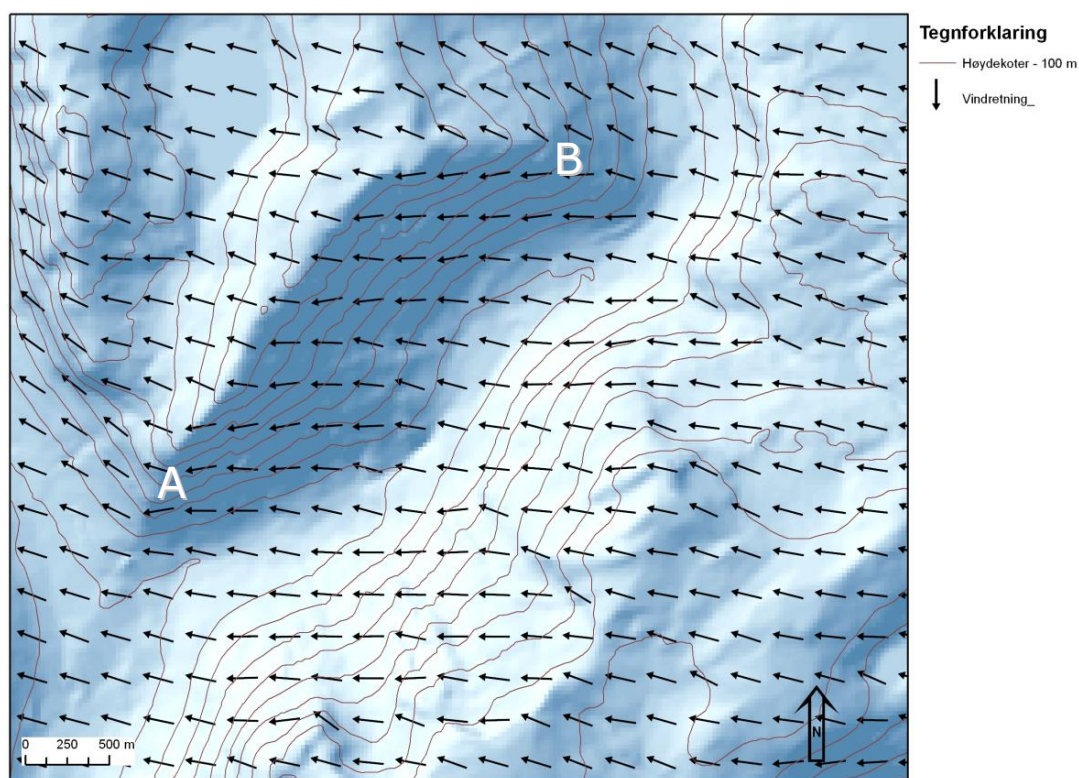
Resultatet fra vindfeltsmodellen var et rasterlag med samme oppløsning som terrengmodellen, det vil si 25 x 25 meter. For presentasjonsformål ble det laget et punkt av hver tiende celle, som så ble symbolisert til et vindfeltskart (Figur 4-25). Kartet viste at modellen bøyde vinden i henhold til helningen. Vinden ble blant annet adskilt på hver side langs fjellryggen i den vestlige delen av området («A» i kartet). På den vestlige fjellsiden ble vinden bøyd mot vest, mens på den østlige delen bøyd vinden mot øst. Dette førte til at vinden ble modellert til å blåse langs dalen. Ved dalneset («B» i kartet) ble så vinden bøyd mot venstre langs vindretningen, slik at vinden også her fulgte dalen.

Figur 4-26 viser vindfeltet for det samme området med en varslet vindretning på 105°. Vindfeltet gikk i dette tilfellet nærmest på tvers av dalen, og fulgte dermed ikke dalen på

samme måte. I dette tilfellet adskiltes vinden langs dalneset «B». Rundt fjellrygg «A» ble vinden kun bøyd mot øst i dette tilfellet.



Figur 4-25 Modellert vindfelt i Grasdalen ved 195° vindretning.



Figur 4-26 Modellert vindfelt i Grasdalen ved 105° vindretning.

Modellen beregnet vindretningen per celle uavhengig av vindretningen i nabocellene. Det vil si at hvis vinden ble avbøyd i ei celle, ville ikke denne endringen i vindretningen ha noe effekt på vindretning i de cellene som vinden flytter til, ei heller på cellen på sidene for denne cella.

Kombinert med nedbørsdata dannet vindfeltene basis for beregninga av snødriften.

Snødriftsberegningen ble implementert ved hjelp av en snødriftsmodell. Modellen hadde tidligere blitt beskrevet av Stocker-Mittaz (2001), basert på et arbeid av Ryan (1977).

Modellen er en enkel numerisk modell for omdistribusjon av snø basert på en omdistribusjonsfaktor for hver celle (Stocker-Mittaz 2001):

$$P = P \pm P * i_{pos} * 0,25 * \sum_{drift} \text{ (Formel 7)}$$

hvor P = Nedbør, i_{pos} = celleindeks som indikerer le eller loppisjjon (verdi mellom -1 og 1) og \sum_{drift} = totalt reakkumulert eller erodert snø.

Denne ble forenklet og implementert i ArcGIS på følgende måte:

$$P = P * (1 - i_{leklasse} * 0,25 + i_{loklasse} * 0,25) \text{ (Formel 8)}$$

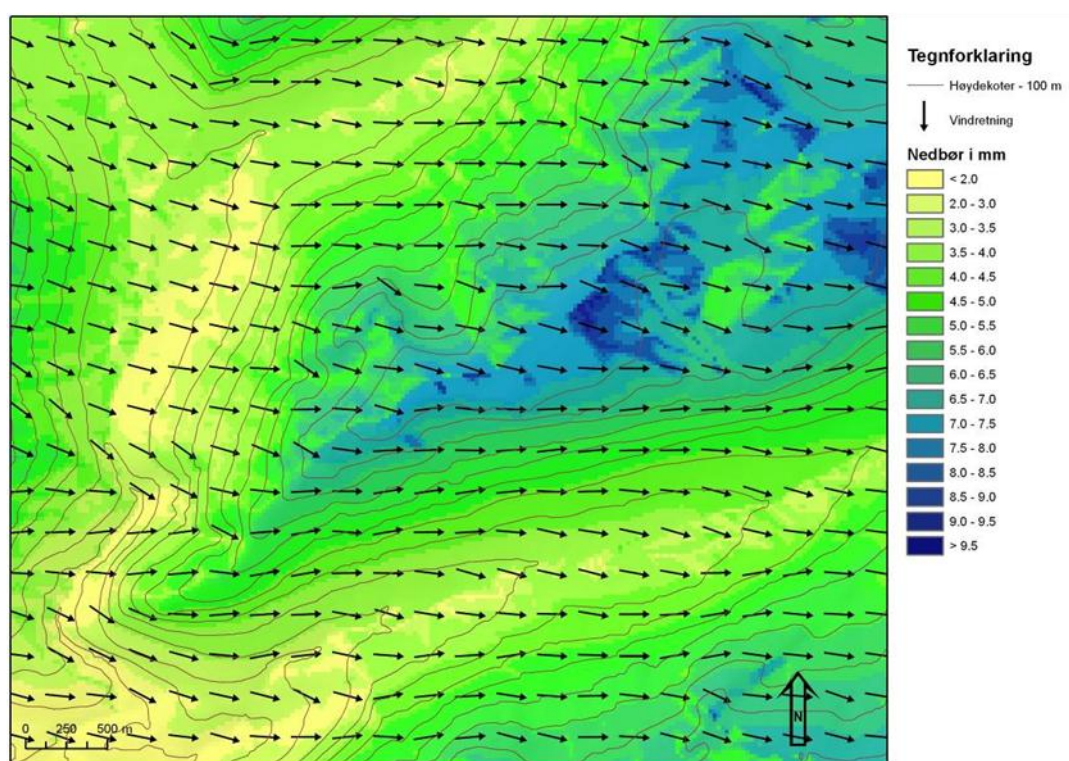
hvor $i_{leklasse}$ og $i_{loklasse}$ er celleindekser med verdi mellom 0 og 1 for celler i henholdsvis lesiden og losiden. Maksimum 25% av nedbøren ville dermed gjendistribueres. Losidene, de vindutsatte områdene, fikk negative verdier og en reduksjon i snømengden, mens lesiden fikk positive verdier og økt snømengde. Graden av forflytning ($i_{leklasse}$ og $i_{loklasse}$) var først og fremst avhengig av vindretning i forhold til helningsretning, og av helningsgraden.

Da snødriftsmodellen ikke tok høyde for vindstyrke, ble det valgt å legge til vindstyrken som en femte parameter. Mengden snø som ville forflyttes av snødrift ville da være eksponensielt avhengig av vindstyrken i tredje potens (Jaedicke 2001). Det ble derfor innført to nye parametre, vindstyrkefaktor og vindstyrkepotens. Vindstyrkefaktoren anga en faktor for mengden av snøen som ble forflyttet, mens vindstyrkepotensen anga eksponenten i den eksponensielle forflytningen. Vindstyrken ble i modellen antatt å være konstant i området. Formelen for snødrift etter inkluderingen av vindstyrke:

$$P = P * (1 - (i_{leklasse} * 0,25 + i_{loklasse} * 0,25) * WDFA * WS^{WDPO}) \text{ (Formel 9)}$$

hvor WS = vindstyrke, WDFA = vindstyrkefaktor, WDPO = vindstyrkepotens.

Resultatet av snøstabilitetsmodellen var et rasterdatasett med nedbør etter snødrift. Resultatet fra en dag med 285° vindretning viste hvordan snøen samles mest i de fjellssidene i lesida, det vil si i fjellsider med østlig helningsretning (Figur 4-27). En simulering av snødriften for fire vindretninger ble utført, og resultatene er gitt i Vedlegg B og som animasjon i Vedlegg M.



Figur 4-27 Vindretning 285°.

I tillegg til snødrift ville det være andre prosesser som bidro til gjenfordeling av snø. Blant annet ville ikke snø samles i terreng brattere enn 45°, men skli til områder nedenfor, og akkumuleres i helninger under 20° (Jaedicke 2001). Disse prosessene ble ikke forsøkt modellert.

4.3.5 Sensitivitetsanalyse

Modellene brukte flere datasett med varierende kvalitet, og var sårbar for feil i hvert av dem. Mens terrengmodellen hadde antatt standardavvik på 4-6 meter (Kjekshus 2008), var

kvaliteten ukjent for flere av de meteorologiske dataene. Standardavviket var kun oppgitt for noen av sensorene ved værstasjonene, mens for prognosene var ikke kvaliteten tallfestet. I tillegg til datasettene, kunne skjærstyrken justeres. I studien ble den holdt konstant, men feil i antatt skjærstyrke vil kunne gi sterke utslag i snøstabilitetsindeksen.

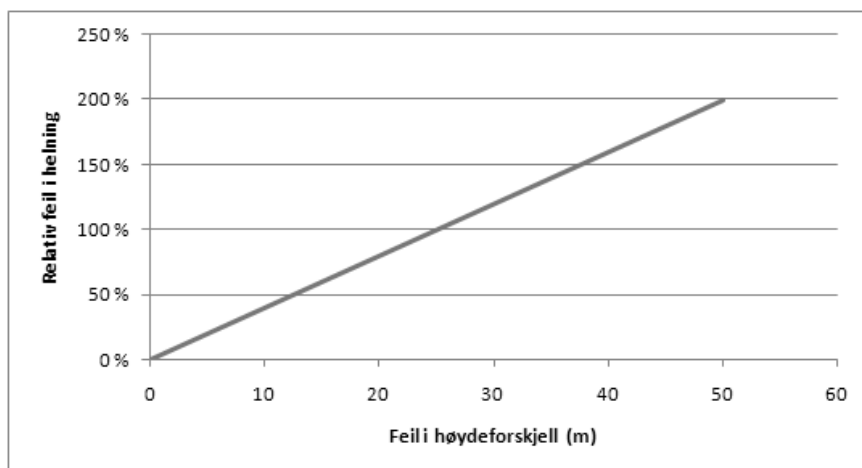
Selv om kvalitetsestimater manglet for de fleste variablene, kunne modellens sensitivitet overfor feil i variablene estimeres. Fra terrengmodellene ble to terrengattributter beregnet; helning og helningsretning. Ved å endre helningsfunksjonen brukt av ArcGIS til å gjelde feil i høyde, kan vi beregne av feil i helning ved hjelp av feil i høydeforskjellen mellom to celler. Fra ArcGIS hjelpedokumentasjonen beskrives helning mellom to celler som:

$$\text{Helning} = \text{høydeforskjell mellom cellene} / \text{avstand mellom cellene} \text{ (Formel 10)}$$

Til bruk i sensitivitetsanalysen blir den modifiserte formen for feil i helning:

$$e_s = e_{\Delta h(xy)} / d_{xy} \text{ (Formel 11)}$$

der e_s = feil i helning, $e_{\Delta h}$ = feil i høydeforskjell mellom to naboceller, og d_{xy} = avstand mellom cellene. En feil i høydeforskjell på 5 meter mellom to naboceller med 25 meters avstand vil dermed gi 20 % feil i helning (Figur 4-28).

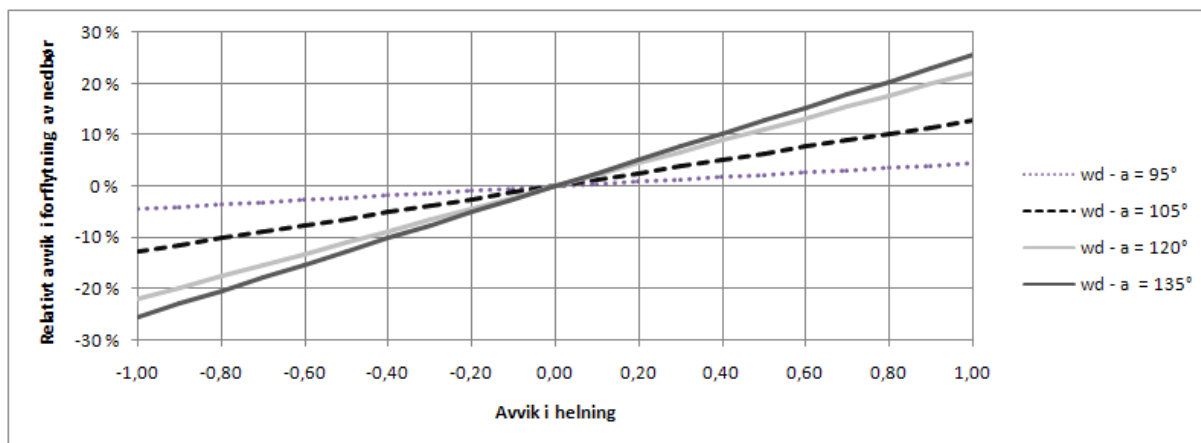


Figur 4-28 Helningens sensitivitet til feil i høydeforskjeller mellom to naboceller.

Feilen kan også føre til feil i helningsretningen. Helningsretningen for ei celle er himmelretningen mot nabocella med lavest høydeverdi, og en feil høydeverdi for ei celle vil

føre til feil i helningsretningen. Problemet oppstår spesielt i lite kupert terreng, der forskjellen i høydeverdier mellom naboceller er liten.

Helningen brukes av to forskjeller undermodeller av vindmodelleringa. Først opptrer den som multiplikasjonsfaktor i vindfeltsberegningen, som angir nedbørsmengden for ei celle etter snødrift. Ved å bruke Formel 9 kan vi beregne effekten feil i høydeverdi på snødriften (Figur 4-29). Ved maksimum snødrift, det vil si at forskjellen mellom helningsretningen og vindretningen er 135°, vil en feil i helning på 20 prosentpoeng medføre 5 % for høy forflytting av nedbør. Snømengden blir brukt som multiplikasjonsfaktor i beregninga av snøens skjærkraft, og i tilfellen med 5 % økning i nedbør vil skjærkraften bli 5 % for høy.

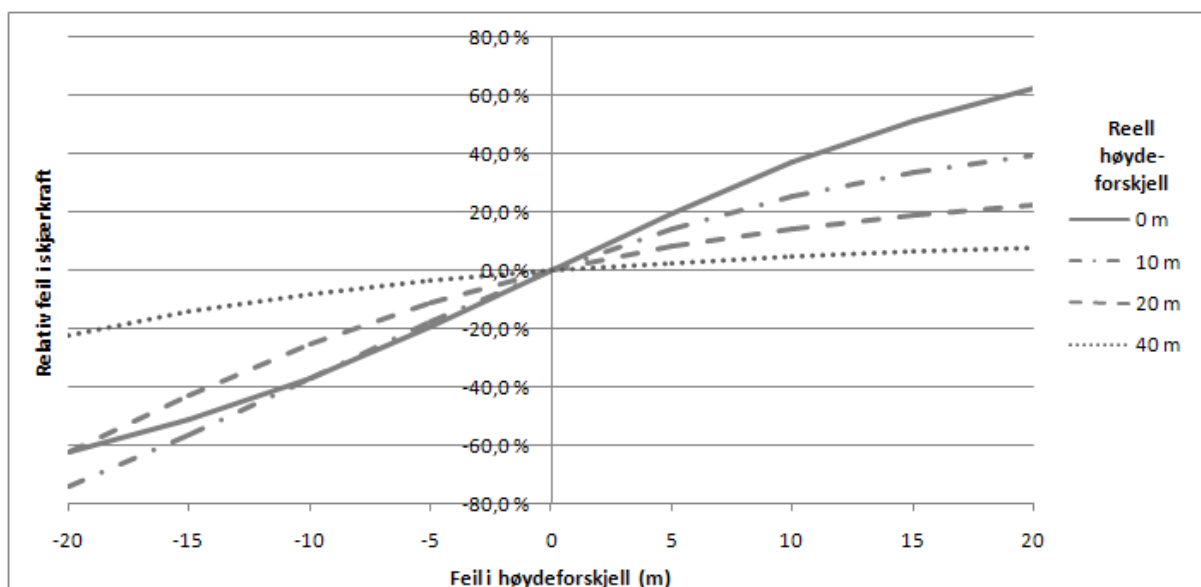


Figur 4-29 Snødriftsmodellen sensitivitet overfor feil i helning vist for fire tilfeller av forskjell mellom vindretning (wd) og helningsretning (a).

I tillegg inngår helningens sinusverdi direkte som en multiplikasjonsfaktor i beregninga av skjærkraften:

$$e_{\text{skjærkraft}} = w_{\text{snødekket}} * (\sin(S_e - S_h)) \text{ (Formel 12)}$$

hvor $e_{\text{skjærkraft}}$ er feil i skjærkraft, $w_{\text{snødekket}}$ er snødekkets vekt, S_e er helningen til høydeforskjell med feil, og S_h er helningen til rett høydeforskjell. Effekten en feil i høydeforskjell mellom naboceller har på skjærstyrken vil avhenge av høydeforskjellen mellom dem (Figur 4-30). Hvis den reelle høydeforskjellen mellom cellene er 20 meter (39° helning), fører for eksempel en feil i høydeforskjellen på +10 meter til 32 % for høy skjærkraft. Dette kommer i tillegg til feilen i snødriftsmodellen, som nevnt ovenfor.



Figur 4-30 Skjærkraftens sensitivitet overfor feil i høydeforskjell mellom to naboceller.

Høyden brukes også direkte for å modellere høydeavhengige meteorologiske parametre, det vil si nedbør og temperatur. En høydefeil på 5 meter i disse modellene er imidlertid neglisjerbar; feilen blir kun 0,03 °C for temperaturen og 0,03 mm for 10 mm nedbør.

Foruten feil i terrengmodellen, ville feil i de meteorologiske variablene ha medført feil i snøstabilitetsindeksen. En feil i nedbøren ville medført en feil i skjærkraften som var relativt sett like stor. Ved for lave nedbørsmengder ville skjærkraften dermed blitt for liten, og stabiliteten antatt å være bedre enn i virkeligheten. Feil i vindhastighet og vindretning ville ha påvirket akkumuleringa av nedbøren i lesiden, hvorav feilen i førstnevnte ville ført til en eksponensiell feil i snømengden. Feil i temperaturen var mest kritisk rundt 0°C, hvor for høye verdier kunne ført til antakelser om at snøen var blitt stabilisert uten grunn.

Også skjærstyrken kunne ha inneholdt feil. Skjærstyrken blir antatt å være konstant i våre modeller. Som vi har sett i kapittel 4.1, kan skjærstyrken variere i tid og rom, for studieperioden ble den for eksempel satt til 400N. Skjærstyrken settes manuelt i modellen, og feil i antatt skjærstyrke vil en feil i snøstabilitet av tilsvarende faktor. 25 % for lav skjærstyrke vil for eksempel gi 25 % for lav snøstabilitetsindeks.

Foruten feil i dataene, kunne tidspunkt for observasjoner og prognoser føre til feil i beregnede verdier for de meteorologiske variablene. Multikriterieanalysene ble startet 3 timer etter

publisering av varsel på yr.no, mens varslene for yr.no gjaldt fra og med den neste 6-timersperioden. Analysene manglet derfor meteorologiske data i en 3-timersperiode. Dette ville kun påvirke nedbørsmengden, da den var den eneste variabelen med akkumulerte verdier.

I studieperioden skjedde det også at meteorologiske data ikke var tilgjengelig. Dette skjedde for eksempel for analysene som ble kjørt 18. februar. Manglende oppdatering mellom to interne dataservere ved NGI førte til at data de døgnene ikke ble publisert. Eldre data var likevel tilgjengelig, og gjorde det mulig for modellen å kjøre vanlig. Resultatet ble at den observerte nedbørsmengden ble beregnet til å være mindre enn i virkeligheten, noe som dermed ga for høy stabilitet.

4.4 Validering av multikriterieanalyser

Valideringa av modellen ble gjort både ved å evaluere de meteorologiske dataene og resultatene fra snøstabilitetsmodellen. Vi skal først vise resultatene fra valideringa av de meteorologiske observasjonene og prognosene, før resultatene for snøstabilitetsanalysene for en studieperiode beskrives. Til slutt gis en sammenlikning mellom snøstabilitetsindeksen og NGIs snøskredvarsler fra samme periode.

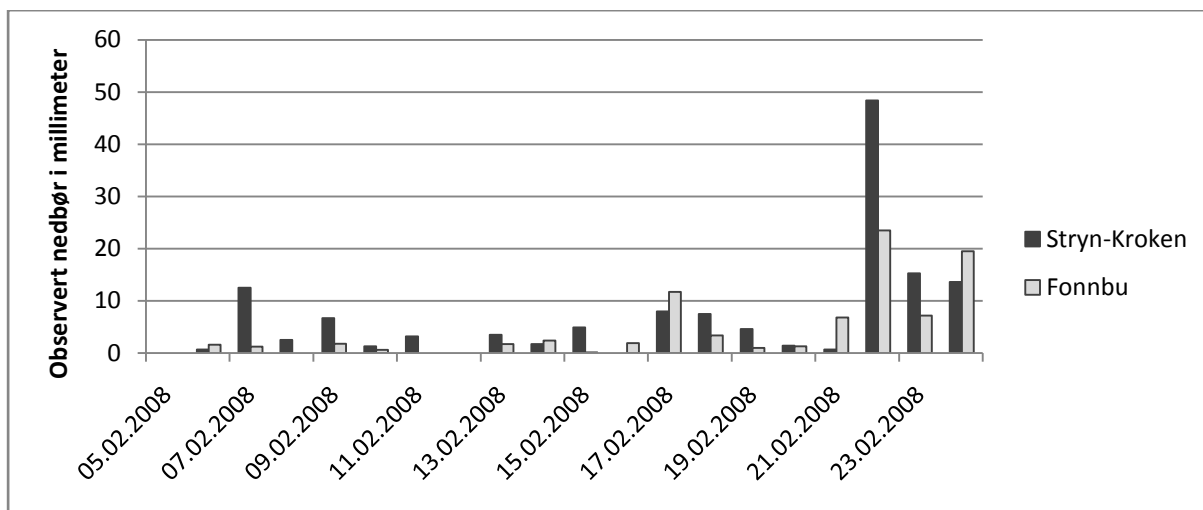
4.4.1 Validering av meteorologiske observasjoner

Romlig variasjon i meteorologiske variabler gjør at valg av værstasjoner for observasjonsdata kan være kritisk for å få et riktig bilde av værsituasjonen. Det fantes flere andre værstasjoner i området, men data fra værstasjonen ved Fonnbu ble brukt både av praktiske årsaker og på grunn av dens nærhet til skredbanene. Værstasjonen på Fonnbu lå i en dalbunn sentralt i studieområdet, ca 930 moh.

Både Statens vegvesen og met.no hadde værstasjoner i området, henholdsvis på Kvitenova (1400 moh.) og Stryn-Kroken (208 moh.), som ga et grunnlag for sammenlikning.

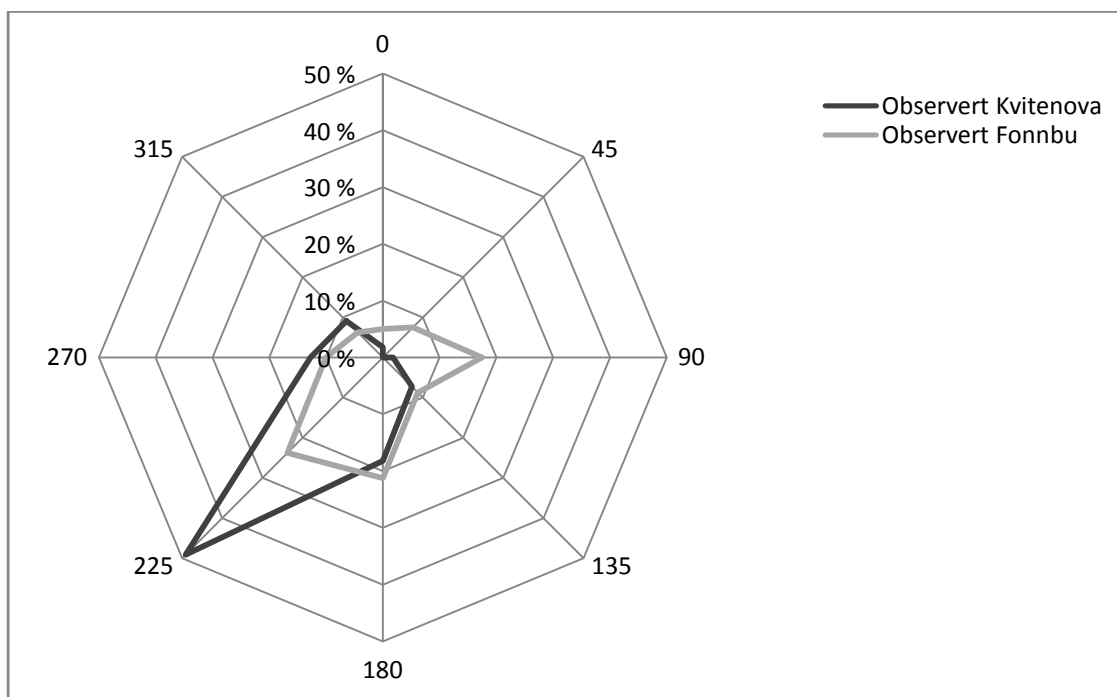
Værstasjonen på Kvitenova målte ikke nedbør, derfor ble sammenlikninger for nedbør gjort mot Stryn-Kroken. De resterende sammenlikningene ble gjort mellom Kvitenova og Fonnbu.

Nedbørsmengden på Kvitenova og Fonnbu var i grove trekk sammenfallende (Figur 4-31). Stryn-Kroken hadde imidlertid vesentlig mer nedbør enn Fonnbu i perioder.



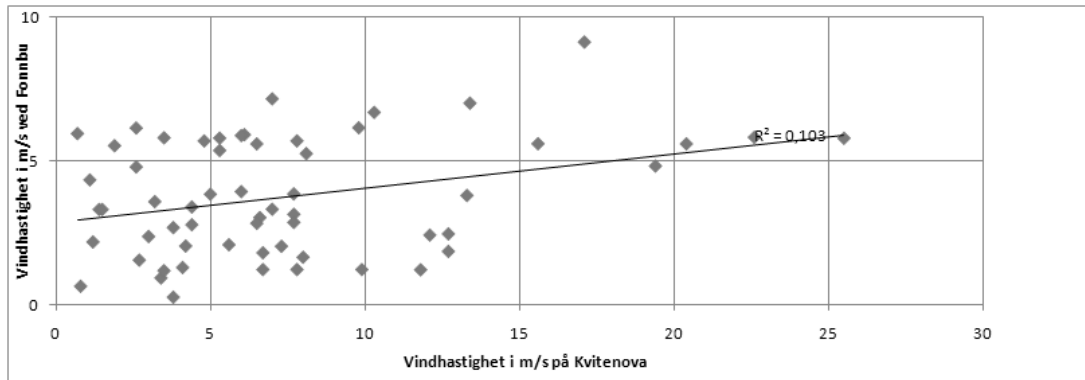
Figur 4-31 Sammenlikning av nedbør for 24-timersperioder mellom Stryn-Kroken og Fonnbu

Vindhastigheten ved Kvitenova og Fonnbu viste derimot lite samsvar (Figur 4-32). På Kvitenova dominerte sørvestlige vinder. Vinden på fjelltopper påvirkes i liten grad av topografien, og dette sammenfalt bra med den generelle vindretningen i området, som var antatt å være fra sørvest. På grunn av Fonnbus plassering i dalbunnen, ble vinden i større grad påvirket av terrenget. Fonnbu hadde derfor en jevnere fordeling mellom de forskjellige vindretningene, med en overvekt av vindretninger fra øst, sør og sørvest.



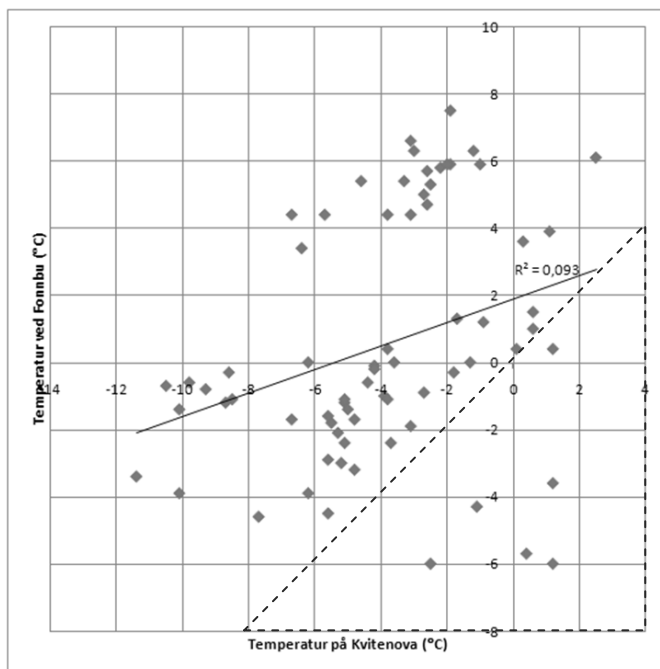
Figur 4-32 Relativ vindfordeling i testperioden i 45° inndelinger.

Vindhastigheten ved de samme to stasjonene var også i stor grad forskjellig, med en korrelasjon på 0,1 (Figur 4-33). Generelt opplevde Kvitenova mye sterkere vindhastigheter. Dataene var derimot ikke direkte sammenliknbare, da enkeltobservasjoner hver 6. time ble brukt for Kvitenova, mens gjennomsnitt av alle observasjonene for 6-timersperioder ble brukt for Fonnbu. Bruk av enkeltobservasjoner ville gitt større variasjon i vindhastighetene.



Figur 4-33 Sammenlikning av vindhastigheter for Kvitenova (enkeltobservasjon) og Fonnbu (6-timers gjennomsnitt).

Den siste sammenlikningen ble gjort for temperaturen ved Kvitenova og Fonnbu. Resultatet viste også her en relativt lav korrelasjon i studieperioden (Figur 4-34). Tilfeller med temperaturinversjon, det vil si høyere temperaturer ved Kvitenova enn Fonnbu, er indikert. En sekvensiell sammenlikning av temperaturer i studieperioden er gitt i Vedlegg D.



Figur 4-34 Sammenlikning av temperatur mellom Fonnbu og Kvitenova i studieperioden. Stiplet triangel indikerer spredningsområdet for temperaturinversjon.

4.4.2 Validering av meteorologiske prognoser

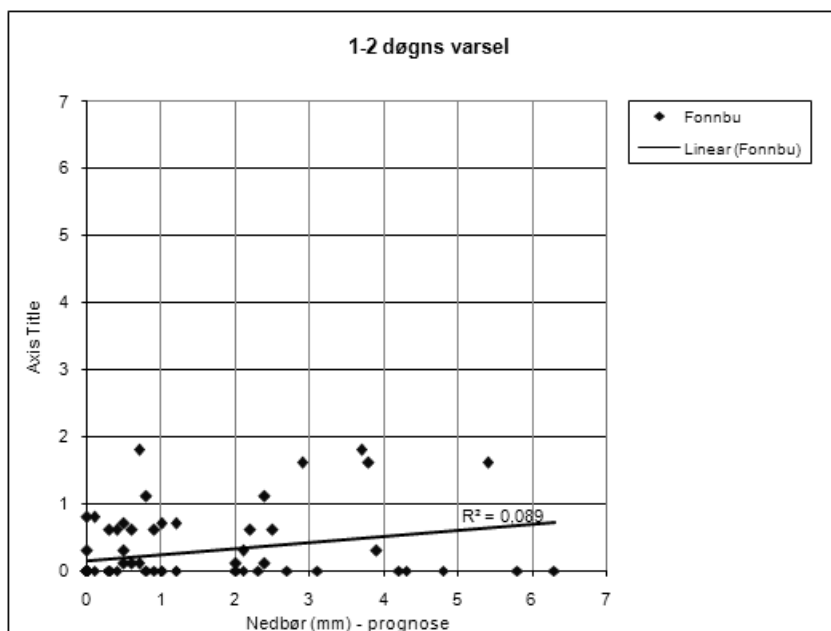
Validering av de meteorologiske prognosene ble gjort ved å sammenlikne prognosene med observasjonene fra Fonnbu og Kvitenova. Datagrunnlaget for sammenlikningen var fra studieperioden 5. – 25. februar. Prognosene ble hentet for posisjonen for Grasdalen i yr.no, ca 800 moh.

Blant metodene for sammenlikning var treffrate, en metode som blant annet tidligere er brukt i studien av Roeger et al. (2001). Treffraten beskriver hvor ofte prognoser slår til ved å definere en terskelverdi. Matrisen i Tabell 4 viser hvordan treff beregnes for vindhastighet for terskelverdien 5 m/s, som er antatt å være minste hastighet for snødrift i modellen. Raten beregnes ved å dele antall treff med summen av treff og feil.

Tabell 4 Metode brukt for beregning av treffrate for vindhastighet (WDSP).

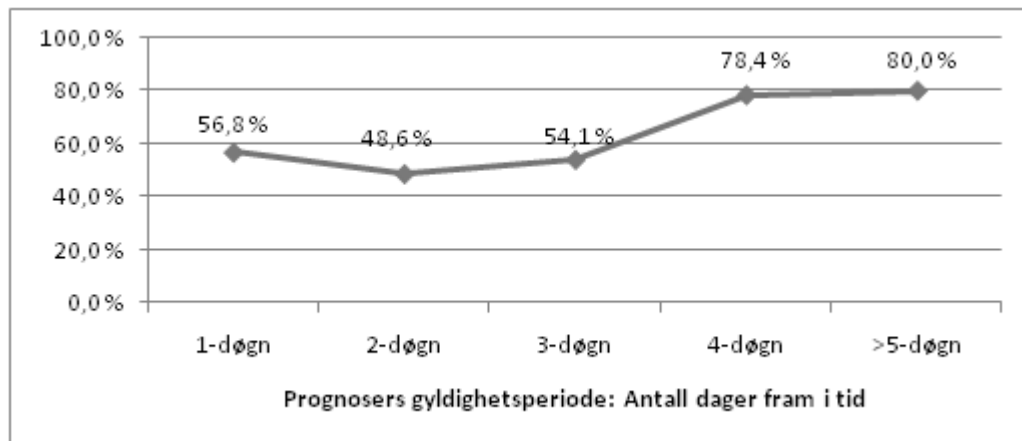
	Varslet WDSP > 5 m/s	Varslet WDSP ≤ 5 m/s
Observert WDSP > 5 m/s	Treff	Feil
Observert WDSP ≤ 5 m/s	Feil	Treff

Sammenlikningen av nedbørsmengden for 6-timersperioder viste en lav korrelasjon mellom observasjoner og prognoser (vises i Figur 4-35). Den observerte nedbøren ved Fonnbu var vesentlig mindre i studieperioden, og det kom dermed mindre regn enn hva som var varslet.



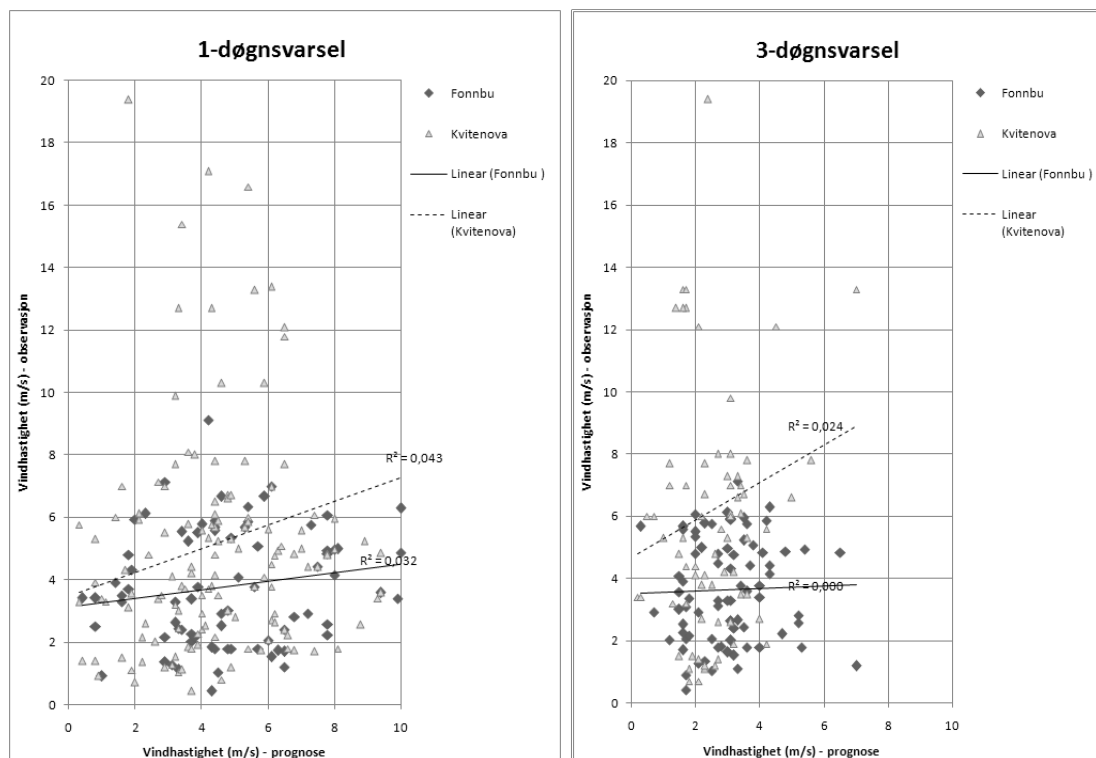
Figur 4-35 Sammenlikning av prognose og observert nedbør siste 24-timer.

Treffraten for nedbøren med terskelverdi på 2 mm var på ca 50 %. Til tross for antatt økende usikkerhet, viste treffraten en stigende tendens for prognoser lenger fram i tid (Figur 4-36).



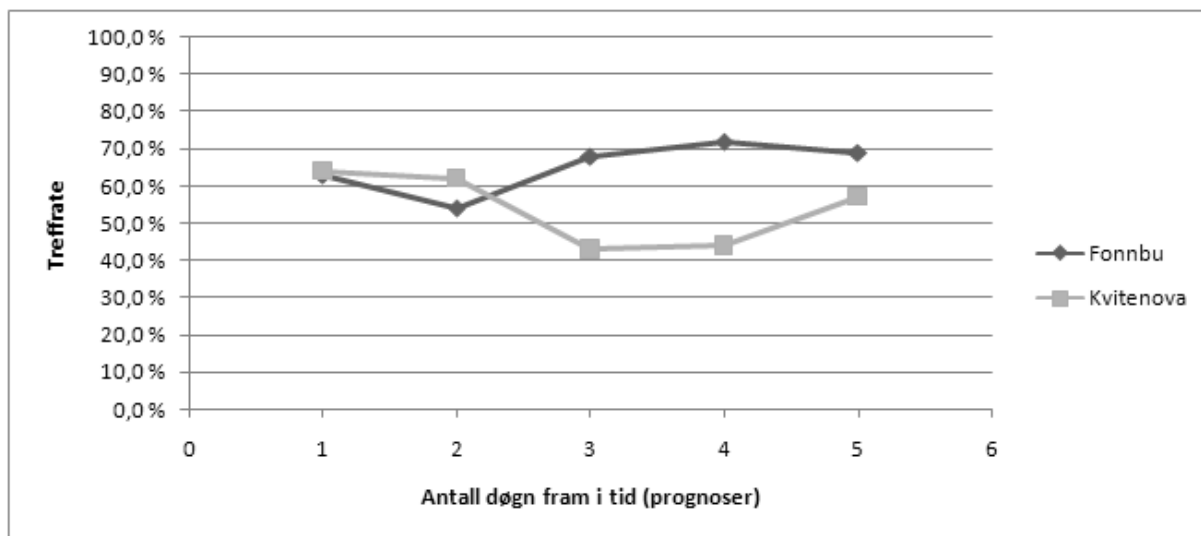
Figur 4-36 Treffrate for nedbørsprognoser mot observasjoner for 24-timersnedbør. Terskelverdi = 2 mm nedbør.

Vindhastighetene viste også en relativ lav korrelasjon for både Kvitenova og Fonnbu (Figur 4-37). Korrelasjonen var noe høyere for 1-døgnsvarslene enn for 3-døgnsvarslene. Kvitenova hadde større variasjon i vindhastigheter enn prognosene, mens Fonnbu hadde en tilsvarende spredning som prognosene.



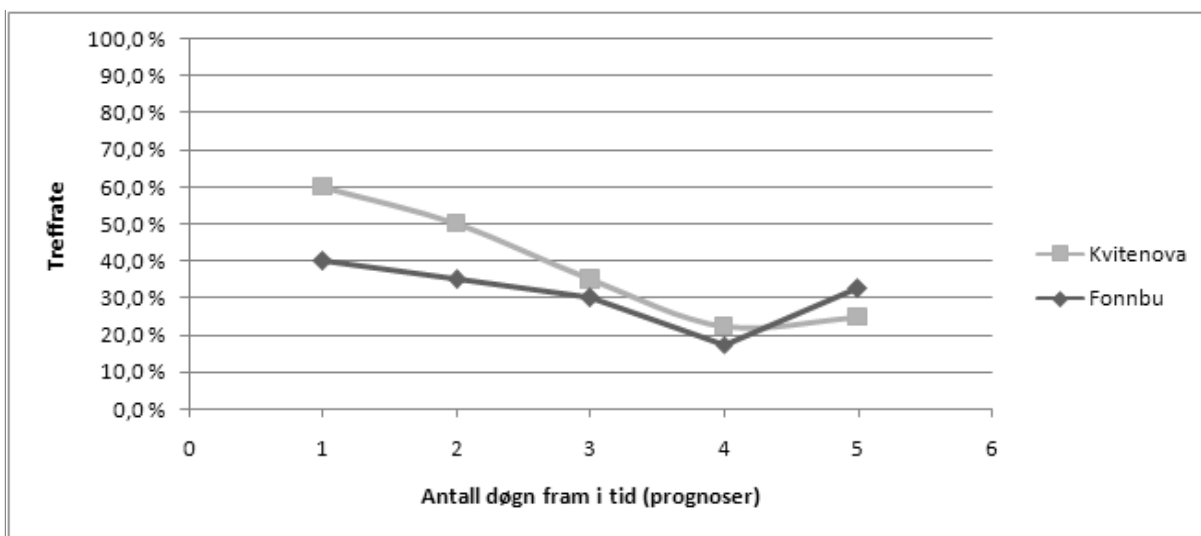
Figur 4-37 Varslede og observerte vindhastigheter med lineær trendlinje for området.

Som vi har sett tidligere, benyttes vindhastigheten til å modellere snødrift. Snødriften ble først aktivert ved vindhastigheter over 5 m/s. Derfor ble det utført treffrateanalyser med en terskelverdi på 5 m/s (Figur 4-38). Treffraten var mellom 40 % og 70 %, og var noenlunde lik for begge stasjonene.



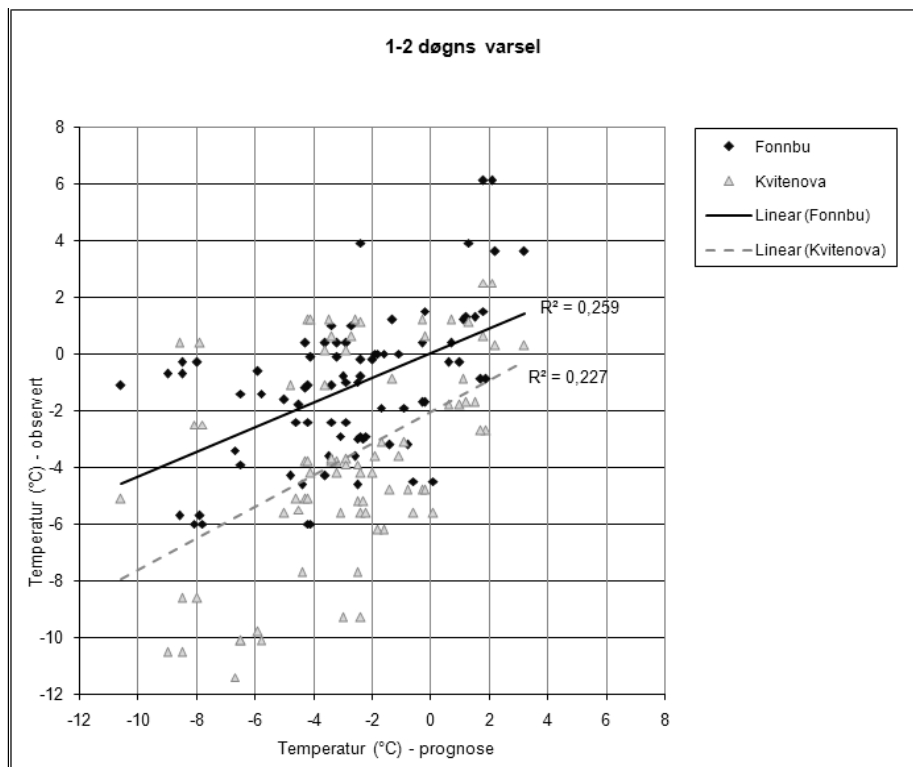
Figur 4-38 Treffrate for vindhastigheten i testperioden for observert vindhastighet mot varslet vindhastigheten. Terskelverdi: 5 m/s.

For vindretninger ble treffprosenten for prognosene beregnet som andel tidsperioder med forskjell mellom observasjon og prognoser på mindre enn 45° (Figur 4-39). Prognosene ga best resultat for Kvitenova, med en treffprosent på 60 % for neste døgns varsel. Treffprosent minket jo lenger fram i tid prognosene gjaldt.



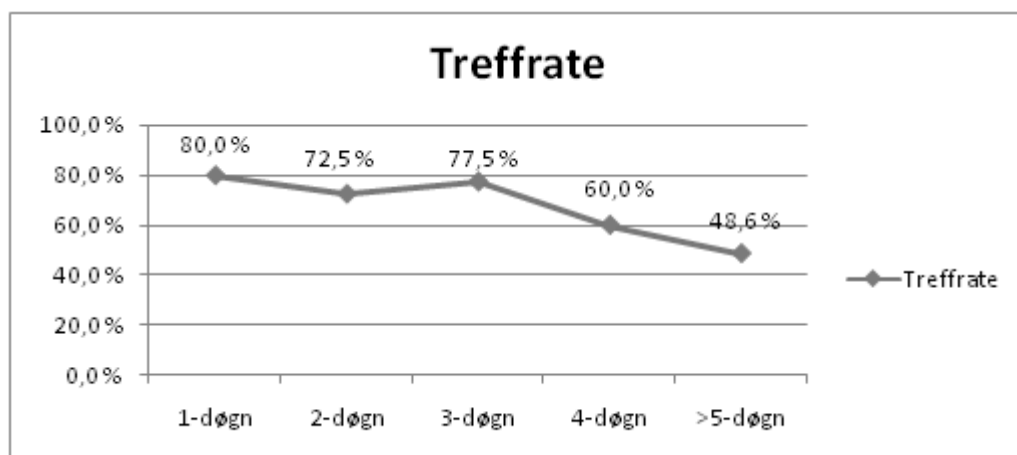
Figur 4-39 Treffprosent for vindretning (forskjellen mellom prognoser og observasjoner $\leq 45^\circ$).

Sammenlikningen mellom varslet og observert temperatur viste en noe bedre korrelasjon enn vindhastigheter og nedbør, med R^2 rundt 0,25 for både Fonnbu og Kvitenova (Figur 4-40). På grunn av høydeforskjellen mellom værstasjonen og prognosestedet, var temperaturen på Kvitenova 2,4°C lavere enn prognosene i gjennomsnitt. Temperaturen på Fonnbu var imidlertid 1,0°C varmere enn prognosene, til tross for at stasjonen lå over 100 meter høyere.



Figur 4-40 Sammenlikning av observert og varslet temperatur med lineære trendlinjer.

Temperaturprognosene viste en høy treffrate for temperaturer over 0°C (Figur 4-41). For de påfølgende 3 dagene var treffraten på over 70 %, mens raten var noe lavere for prognoser lengre fram i tid.



Figur 4-41 Treffrate for temperaturprognoser mot observasjoner. Kriterie: Temperatur > 0 °C.

4.4.3 Studieperiode

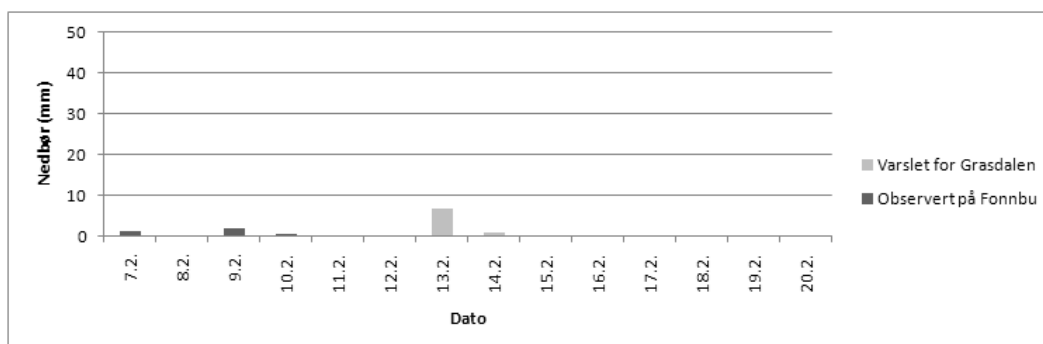
Valideringa av snøstabilitetsindeksen ble gjort ved å eksekvere modellen regelmessig i en studieperiode, og evaluere resultatene. Snøstabilitetsmodellen ble kjørt automatisk 4 ganger om dagen i perioden 9. – 19. februar. Studieperioden inkluderte for øvrig vinterferieuka på skolene, og et høyt aktivitetsnivå var derfor forventet i området.

Resultatene av hver kjøring ble kvalitetssjekket og analysert. Analysene ble utført på resultater fra modellkjøringer kl 03:00 om natta. Dette vil si at meteorologiske varsler publisert på yr.no kl 00:00 ble brukt. De meteorologiske prognosene gjaldt fra og med neste 6-timersperiode, det vil si etter kl 06:00 samme dag. Observasjoner helt fram til startpunktet for modellkjøringa ble inkludert.

Snøstabilitetskartene ble sammenliknet med meteorologiske observasjoner og varsler fra samme dag. Av praktiske hensyn ble de fleste av disse dataene hentet ut kl 09:00, 6 timer etter snøstabilitetsmodellen. Enkelte av modellkjøringene feilet, men dette problemet var minimalt for kjøringene kl 03:00 i forhold til andre tidspunkt. I de neste kapitlene skal vi se på modellens resultater for studieperioden. En oversikt over alle snøstabilitetskartene er gitt i Vedlegg C.

4.4.4 Dag 1 – 3, prognoser produsert 9.2 – 12.2

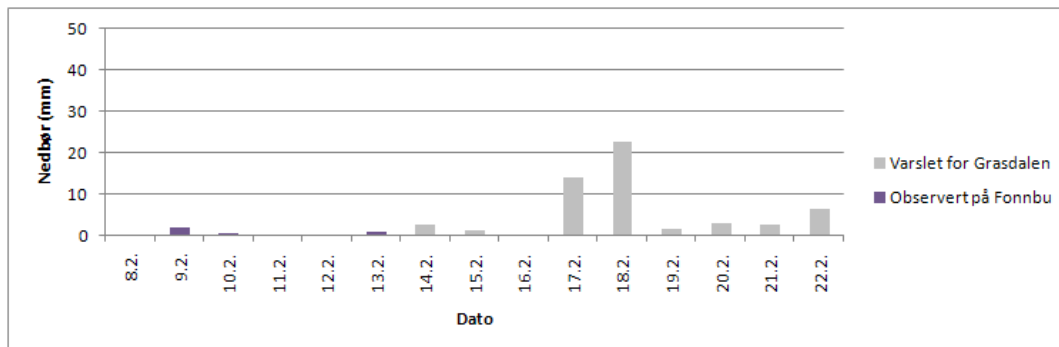
Snøstabilitetsmodellen varslet god snøstabilitet for begynnelsen av studieperioden. Alle skredbanene ble klassifisert som stabile. Observerte og varslet nedbør var lav for hele perioden (Figur 4-42). Dette ga god stabilitet for alle varslene produsert de første dagene.



Figur 4-42 Observerte og varslet nedbør for analysedag 11.2.

4.4.5 Dag 4 – 5, prognoser produsert 13.2 og 14.2

Varslene som ble produsert 13.2 viste en vesentlig endring i situasjonen (Figur 4-43). Fram til og med 17.2 var snøstabiliteten god for hele området. Nedbør ble imidlertid forventet å komme inn over området denne dagen, noe som ga utslag i varselet for påfølgende dager.

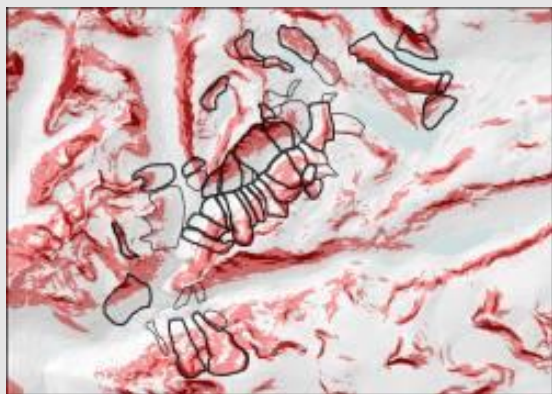


Figur 4-43 Observert og varslet nedbør for analysedag 13.2.

På grunn av den varslede nedbøren 17.2, forventet prognosene reduksjon i snøstabiliteten 18.2 (Tabell 5). Nedbør var i tillegg forventet 18.2, noe som ville føre til en ytterligere reduksjon i stabiliteten 19.2. Den dårlige stabiliteten ville holdes ut perioden, da nedbøren 18.2 ville være tellende helt til 22.2.

Tabell 5 Utvalgte snøstabilitetskart som varslet 13.2

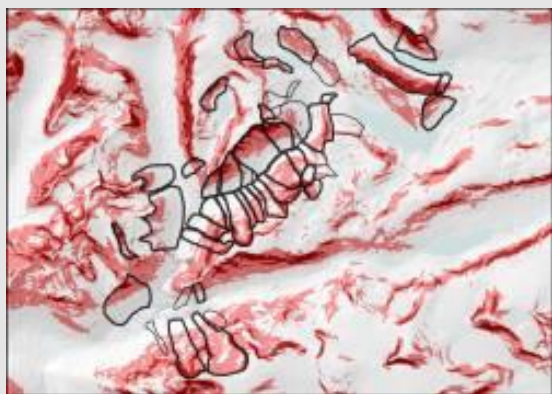
Varsel for 18.2, analysert 13.2:



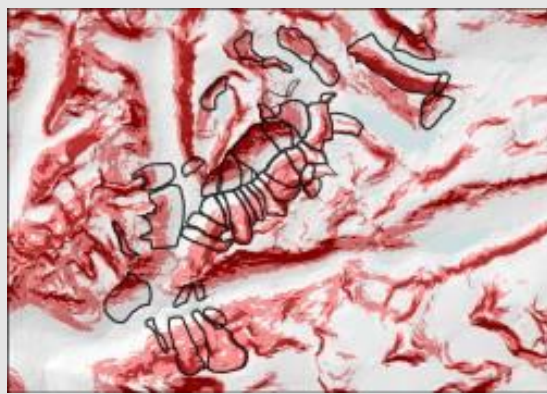
Varsel for 19.2, analysert 13.2:



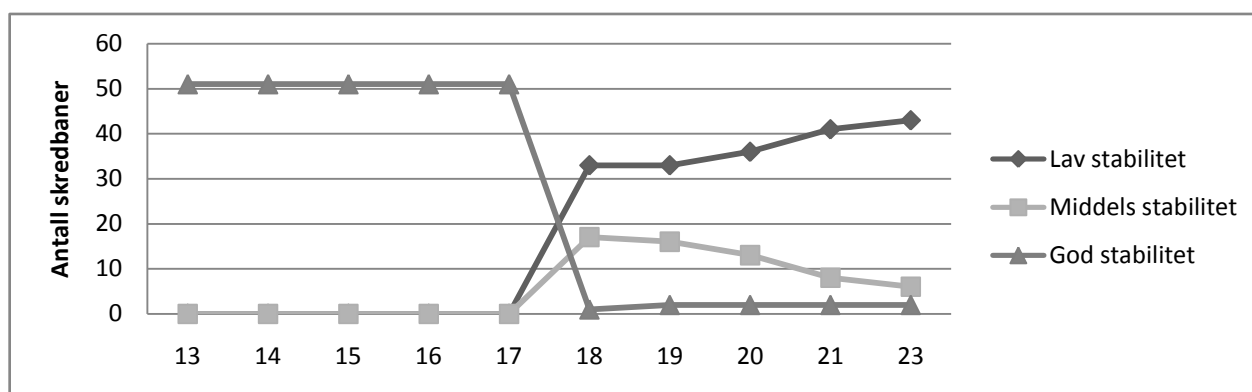
Varsel for 20.2, analysert 13.2:



Varsel for 23.2, analysert 13.2:

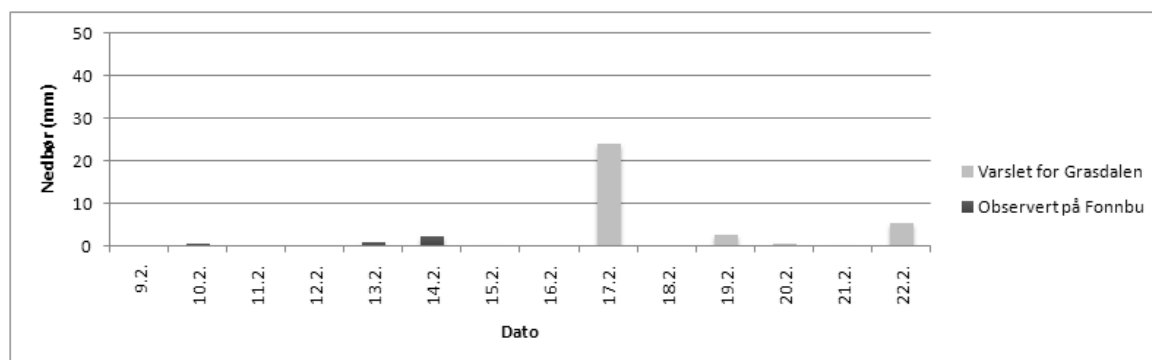


Prognosene 13.2 forventet at de fleste skredbanene skulle få lav stabilitet etter nedbøren 17.2 (Figur 4-44).



Figur 4-44 Antall skredbaner inndelt i stabilitet for analysedagen 13.2.

I værvarselet som ble produsert 14.2 økte den forventede nedbørsmengden (Figur 4-45). Nedbøren 18.2 var den største forventede nedbørsmengden for alle prognosene i studieperioden, over 40 mm i løpet av en 24-timers periode.



Figur 4-45 Varslet og observert nedbør pr 14.02 kl 03:00.

Den store nedbørsmengden kom klart fram i snøstabilitetskartene (Tabell 6). Fram til 17.2 var snøen forventet å holde seg stabil, men nedbøren 17.2 ville gi lav stabilitet for 18.2. Med over 40 mm nedbør 18.2 skulle snøstabiliteten bli svært lav for de påfølgende dagene, og dette skulle holde seg nesten ut perioden.

Tabell 6 Utvalgte snøstabilitetskart som varslet 14.02

Varsel for 18.02, analysert 14.02:



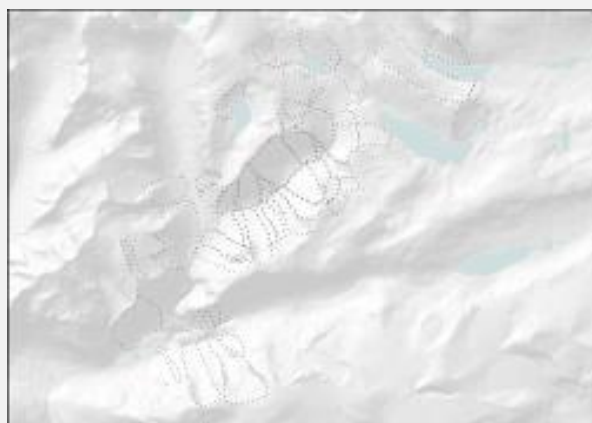
Varsel for 19.02, analysert 14.02:



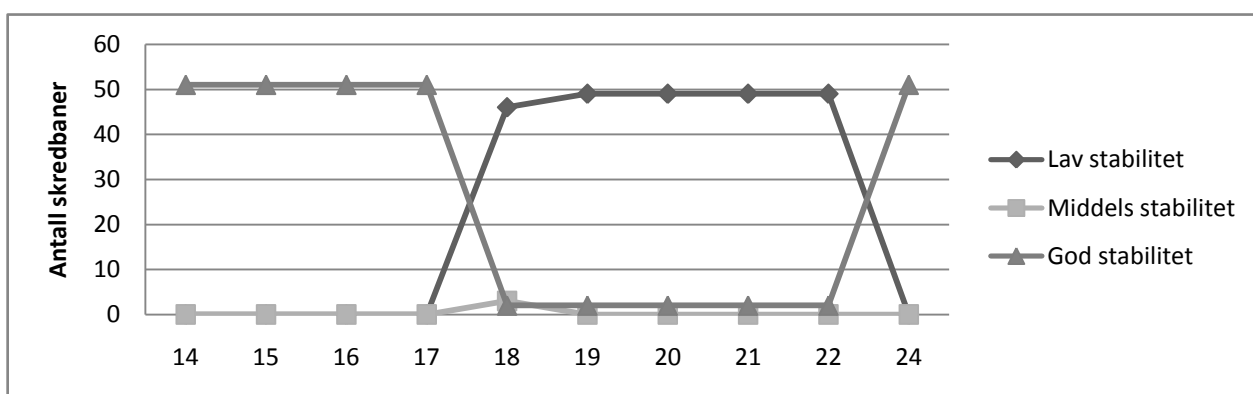
Varsel for 22.02, analysert 14.02:



Varsel for 24.02, analysert 14.02:



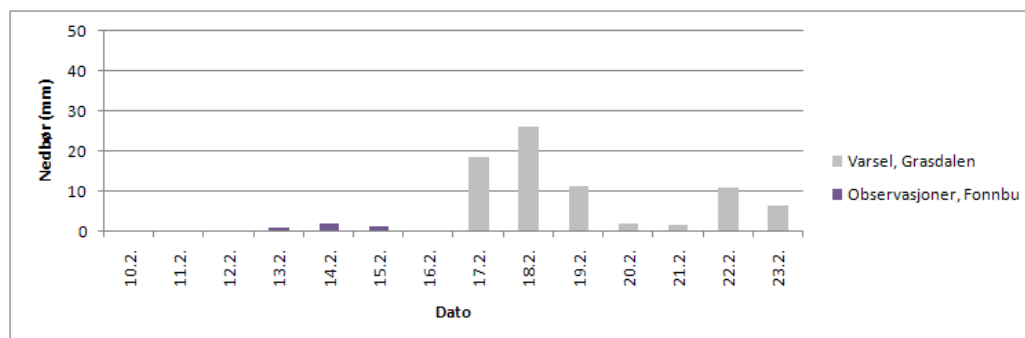
Det markante skiftet i nedbør vises også i antallet skredbaner med lav stabilitet (Figur 4-46). Mens det ikke var ventet noen skredbaner med lav stabilitet 17.2, skulle de fleste ha lav stabilitet dagen etter.



Figur 4-46 Antall skredbaner inndelt i stabilitet for analysedagen 14.2.

4.4.6 Dag 6 – 8, prognoser produsert 15.2 – 17.2

Prognosene som ble produsert 15.2 – 17.2 forventet en viss reduksjon i nedbørsmengden i forhold til prognosene tidligere prognoser. Allerede for prognosene fra 15.2 framkom denne trenden, og stabiliteten var forventet å bedre seg noe. Nedbøren var fortsatt forventet å komme på samme dato, dvs. 17.2, men i mindre mengder enn tidligere antatt (Figur 4-47).



Figur 4-47 Varslet og observert nedbør pr 15.02.

Nedbørsmengden ville likevel være stor nok til å skape lav stabilitet (Tabell 7). Mot slutten av varselsperioden telte imidlertid ikke nedbøren for 18.2 lenger, og stabiliteten ville øke igjen.

Tabell 7 Utvalgte snøstabilitetskart som varslet 15.2

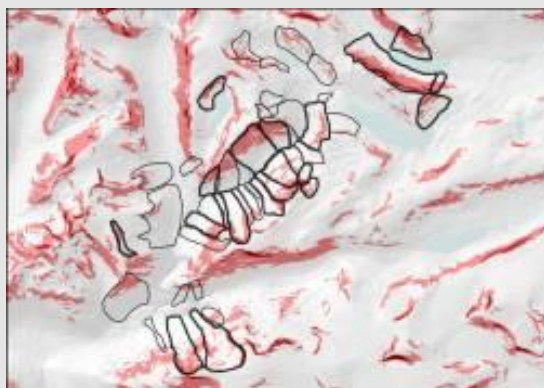
Varsel for 18.02 (analysedato: 15.02):



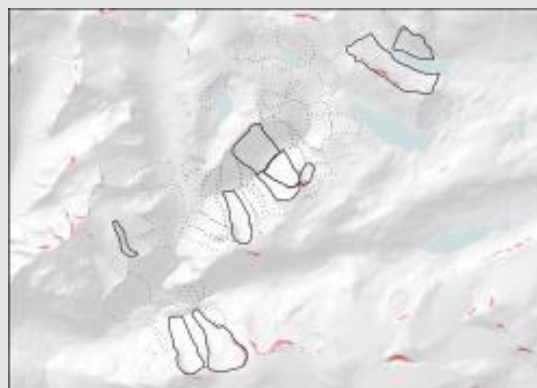
Varsel for 19.02 (analysedato: 15.02):



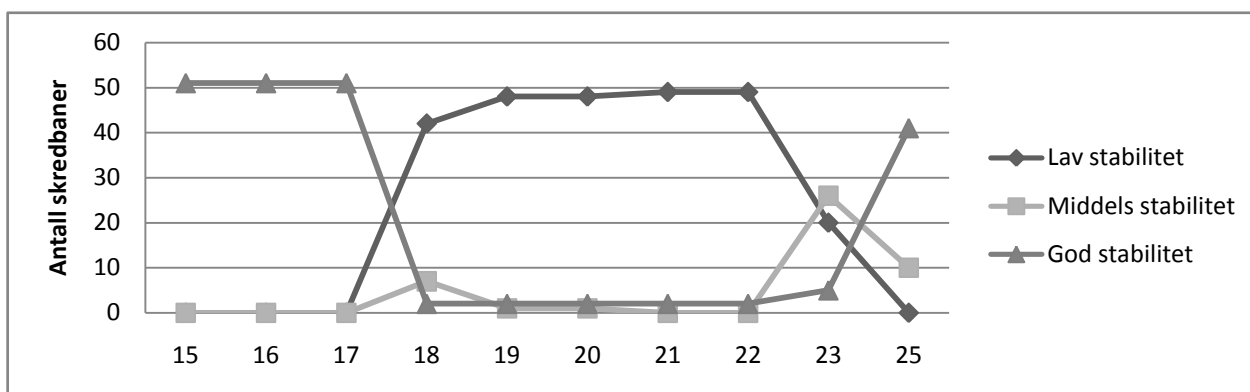
Varsel for 23.02 (analysedato: 15.02):



Varsel for 25.02 (analysedato: 15.02):



Antallet skredbaner med forventet lav stabilitet ville fortsatt være betydelig etter snøfallet 17.2 (Figur 4-48).



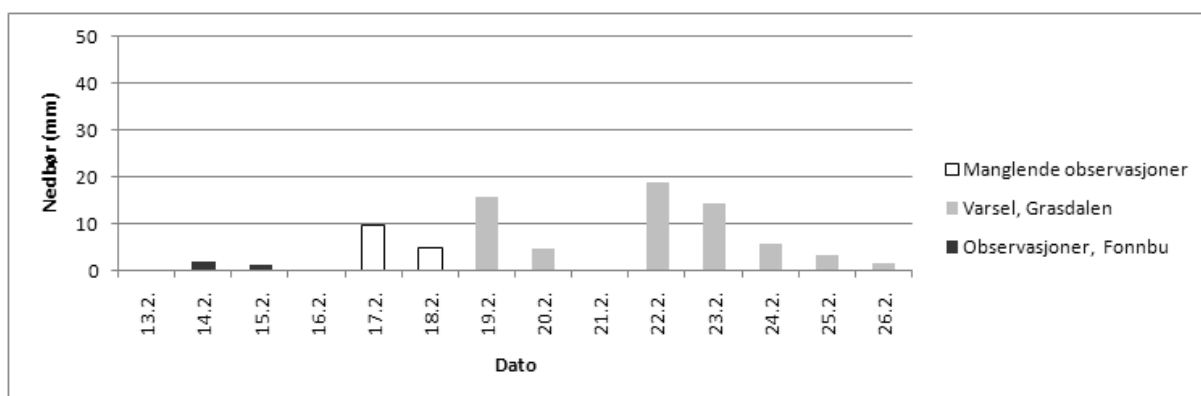
Figur 4-48 Antall skredbaner inndelt i stabilitet for analysedagen 15.2.

For 16.2 og 17.2 var snøstabilitetskartene svært like de for 15.2. De meteorologiske varslene disse dagene viste også at en nedbørsperiode forventet å starte 17.2.

4.4.7 Dag 9, prognoser produsert 18.2

Analysene for 18.2 ble forringet grunnet utdaterte observasjonsdata. Data fra værstasjonen på Fonnbu manglet fra og med 16.2, men inkluderte tidligere registrerte data (Figur 4-49).

Dermed ble ikke observert nedbør 17.2 og 18.2 med i beregningene. Trolig har dette gitt for høy stabilitet for den påfølgende femdøgnsperioden. En ny nedbørsperiode var forventet i området, med størst nedbør i perioden 22.2 – 24.2.

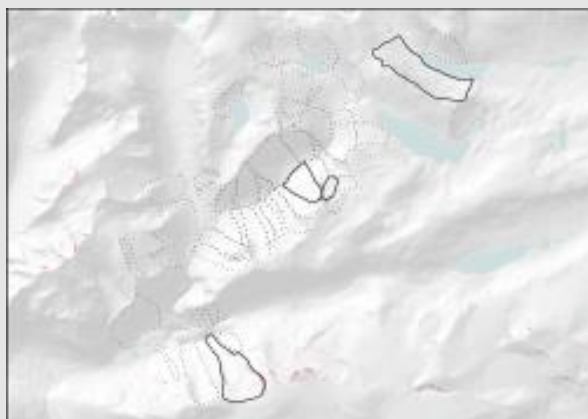


Figur 4-49 Varslet og observert nedbør pr 18.02.

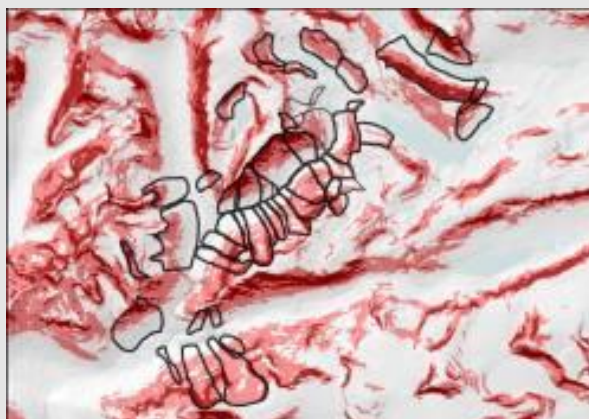
De manglende observasjonene førte til at prognosene fram til og med 22.2 forventet god stabilitet for de fleste skredbanene (Tabell 8). For 23.2 ville imidlertid ny nedbør redusere stabiliteten.

Tabell 8 Utvalgte snøstabilitetskart som varslet 18.2

Varsel for 22.2 (analysedato: 18.2):



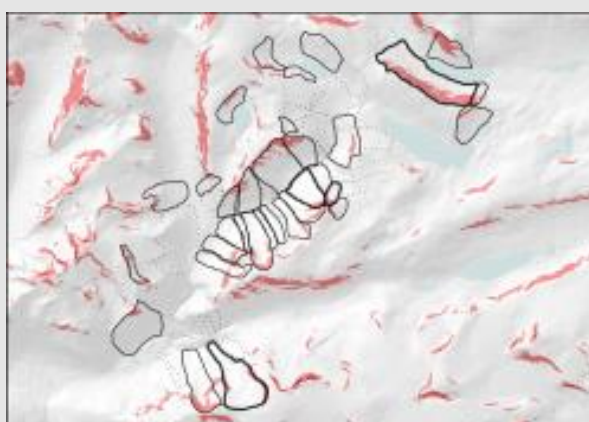
Varsel for 23.2 (analysedato: 18.2):



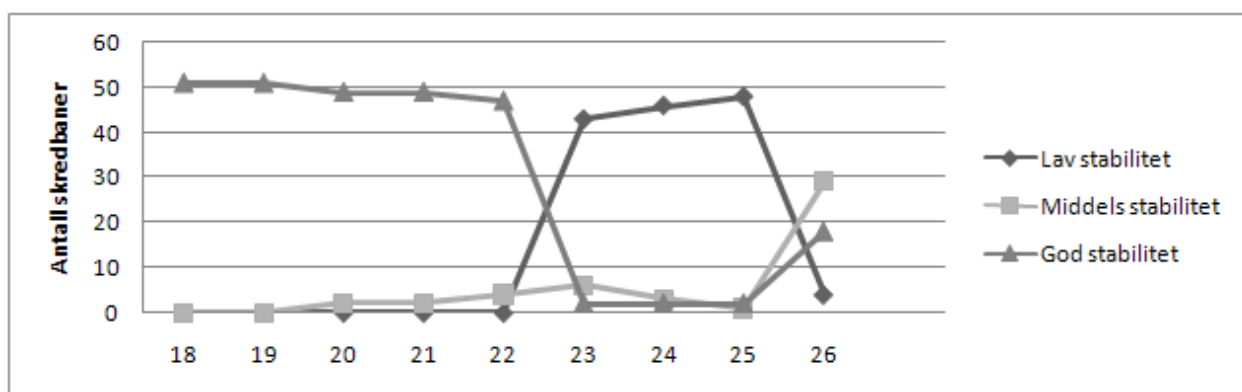
Varsel for 26.2 (analysedato: 18.2):



Varsel for 27.2 (analysedato: 18.2):



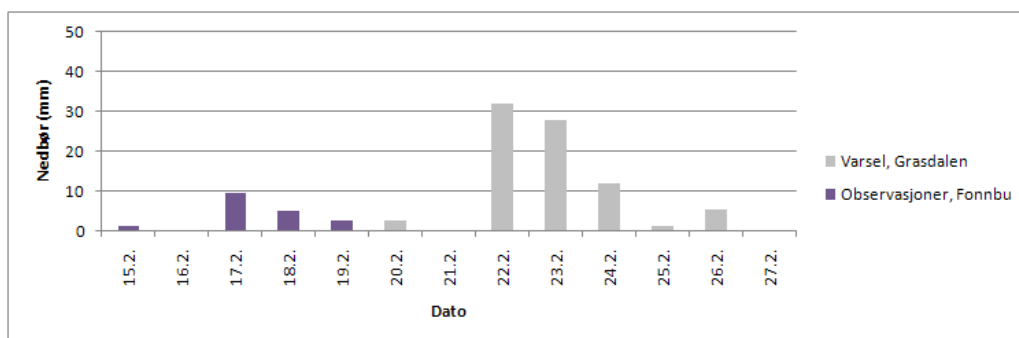
På grunn av de manglende observasjonene ble økningen i antall skredbanene med lav stabilitet forskjøvet til seinere dager i forhold til prognosene fra 17.2 (Figur 4-50).



Figur 4-50 Antall skredbaner inndelt i stabilitet for analysedagen 18.2.

4.4.8 Dag 10, prognoser produsert 19.2

Nedbøren 19.2 ble vesentlig mindre enn forventet (Figur 4-51). Samtidig økte den forventede nedbørsmengden for den kommende nedbørsperioden.



Figur 4-51 Varslet og observert nedbør pr 19. 2.

Til tross for mindre nedbør enn forventet 19.2, var stabiliteten forventet å være lav de første dagene, men det ville skje en midlertidig bedring etter hvert som nedbøren fra 17.2 ble foreldet (Tabell 9). Dagene etter, fra og med 23.2, ville imidlertid nedbøren for 22.2 telle, og stabiliteten dermed svekkes igjen. Stabiliteten var derfor forventet å bli svært lav 25.2.

Tabell 9 Utvalgte snøstabilitetskart som varslet 19.2

Varsel for 19.02 (analysedato: 19.2):



Varsel for 23.02 (analysedato: 19.2):



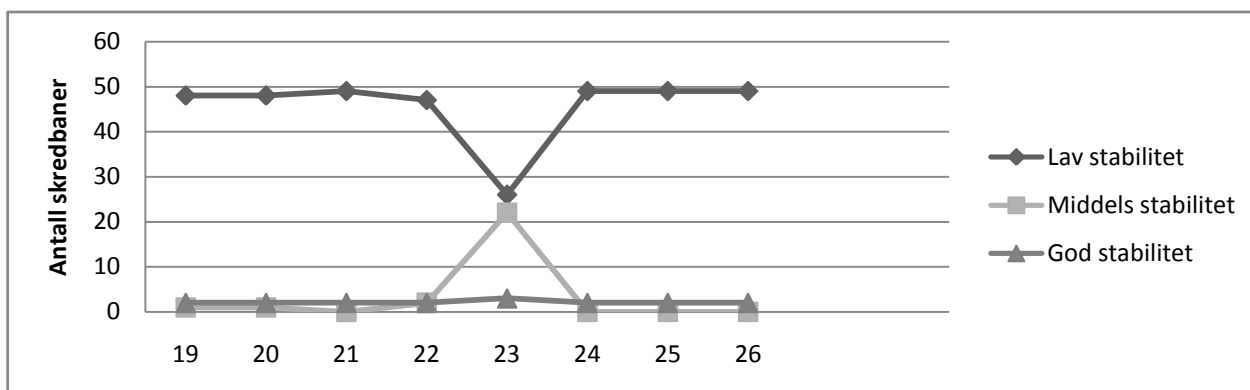
Varsel for 22.02 (analysedato: 19.2):



Varsel for 25.02 (analysedato: 19.2):



Dette varselet var også det første i studieperioden med lav stabilitet for en del av skredbanene fra begynnelsen av varslingsperioden (Figur 4-52). Den midlertidige bedringa i snøstabiliteten den 23.2 viste også igjen i antall skredbaner med lav stabilitet.



Figur 4-52 Antall skredbaner inndelt i stabilitet for analysedagen 19.2.

4.4.9 Sammenlikning med snøskredvarsel fra NGI

Snøskredvarsler fra NGI ble produsert daglig for studieområdet. Varselet gjaldt for hele området, og ble angitt i henhold til de 5 faregradene definert i den europeiske skredfareskalaen (Figur 4-53). Varslene fra NGI inkluderte en tekstlig beskrivelse av kriteriene som lå til grunn for faregraden. Hvis sannsynligheten for endringer var stor, ble skredfaren vurdert på nytt om ettermiddagen. Skredvarslene ble publisert både på Internett, via e-post og via sms. Et sammendrag av beskrivelsene for studieperioden (Tabell 10) indikerte at de viktigste kriteriene var værobservasjoner og –prognoser.

Grad av skredfare	Sannsynlighet for utløsning av skred, skredstørrelse og lokal forekomst.
1. Liten	Utløsning er bare mulig ved store tilleggsbelastninger ¹⁾ og i enkelte svært bratte skråninger. Bare små naturlig utløste skred er mulig.
2. Moderat	Utløsning er mulig ved store tilleggsbelastninger i bratte skråninger. Liten mulighet for naturlig utløste skred.
3. Markert	Skred kan utløses også ved liten tilleggsbelastning ²⁾ . Middels, og enkelte store naturlige skred kan forekomme.
4. Stor	Skredutløsning er sannsynlig også ved liten tilleggsbelastning i de fleste brattheng. Tallrike middels eller store naturlige skred ventes.
5. Meget stor	Tallrike store naturlige skred kan ventes. Skred kan forekomme i områder hvor de tidligere ikke er observert

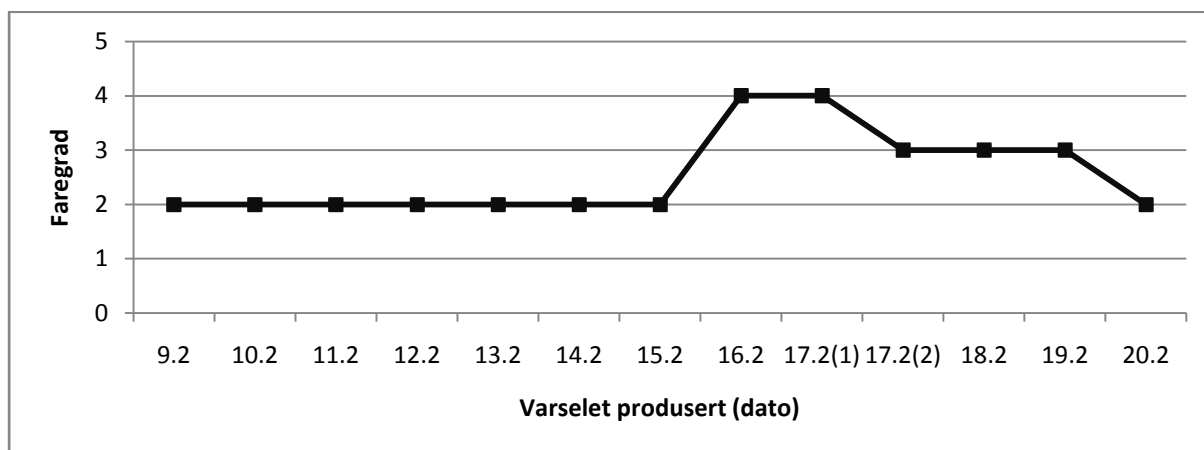
1) Liten tilleggsbelastning: En skiløper eller lignende
2) Stor tilleggsbelastning: grupper av skiløpere, snøscooter, sprengning eller lignende

Figur 4-53 Den europeiske skredfareskalaen (Lied og Kristensen 2003).

Tabell 10 Tekstlig skredfarevurdering (forkortet) fra NGI for Strynefjellet 9.2.2008 – 20.2.2008. Basert på beskrivelser i Vedlegg E.

Varselet produsert	Vurdering
09.02 – 11.02	Stabilt snødekke, rolig vær. Skredfare 2 – moderat
12.02 – 14.02	Varslet nedbør forventes i liten grad å redusere stabiliteten.
15.02	Kjølig vær, lite vind og nedbør ventet påfølgende døgn, men forventet vindøkning, tiltakende snøfokk og byger 16.02.
16.02	Skredfaren forventet å øke til stor på grunn av nedbør og vind.
17.02 (1) - morgen	Mindre nedbør enn forventet, men varslet nedbør og vind tilsa likevel stor skredfare innen kort tid.
17.02 (2) - ettermiddag	Skredfaren stor på grunn av vind og nedbør – markert fare for veien.
18.02	Skredfaren stor i fjellet, markert for veien.
19.02	Økt stabilitet på grunn av synkende temperaturer.
20.02	Snødekket stabilisert på grunn av rolige og milde forhold

Andel skredbaner beregnet til lav stabilitet av snøstabilitetsmodellen (Figur 4-55) ble sammenliknet med den varslede faregraden fra NGI (Figur 4-54). Mens prognosene fra snøstabilitetsmodellen ga lav stabilitet fra og med 17.2 eller 18.2, viste varselet fra NGI økt fare fra og med 16.2. Den tekstlige beskrivelsen av varselet tydet på at bakgrunnen for NGIs vurderinger kun var de neste par døgns værvarsler.



Figur 4-54 Faregrad for Strynefjellet som varslet av NGI for perioden 9.2.2008 – 20.2.2008.

		Prognosens dato															
		13.2.	14.2.	15.2.	16.2.	17.2.	18.2.	19.2.	20.2.	21.2.	22.2.	23.2.	24.2.	25.2.	26.2.	27.2.	28.2.
Dato for modellkjøring	9.2.	0	0	0	0	0	0										
	10.2.	0	0	0	0	0	0	0									
	11.2.	0	0	0	0	0	0	0	0								
	12.2.	0	0	0	0	0	0	0	0	0							
	13.2.	0	0	0	0	0	67	67	73	84	88						
	14.2.		0	0	0	0	94	100	100	100	100	0					
	15.2.			0	0	0	86	98	98	100	100	41	0				
	16.2.				0	98	100	100	100	100	59	0	2	49			
	17.2.					0	94	100	100	100	100	8	0	0	0		
	18.2.						0	0	0	0	86	88	94	98	8		
	19.2.							98	98	100	96	53	100	100	100		
	20.2.								0	0	27	96	100	100	100	90	4

Figur 4-55 Andel baner (%) med lav stabilitet fra snøstabilitetsmodellens prognoser.

5. Diskusjon

Vi har nå sett hvordan multikriterieanalysene ble utført i studien. Basert på erfaringene og resultatene fra analysene skal vi i dette kapitlet diskutere bruken av multikriterieanalyser i snøskredvarsling. Vi skal gå nærmere inn på hvor godt egnet datasettene er til bruk i multikriterieanalysene. Vurderinger av snøstabilitetsmodellen og delmodellene og forslag til hvordan snøstabilitetsmodellen kan bidra i en snøskredvarslingsrutine blir lagt fram. Til slutt skal vi belyse ulike aspekter av en eventuell framtidig bruk av multikriterieanalyser i snøskredvarsling. Vi skal i diskusjonen vise sammenhengen med den teoretiske bakgrunnen i kapittel 2.

5.1 Bruk av multikriterieanalyser i snøskredvarsling

I studien undersøkte vi multikriterieanalyser ved å utvikle en applikasjon med GIS-funksjonalitet. Vi har sett på en del komponenter og egenskaper ved multikriterieanalyser, jf. kapittel 2.1.

Gomes et al (2002) anser de viktigste komponentene for å være de som understøtter interaksjonen mellom brukeren og analysene. Ved å implementere multikriterieanalysene i form av en applikasjon, har vi oppnådd en interaksjon mellom brukeren og analysene gjennom et brukergrensesnitt. Dette gjør beslutningstaker i stand til å utføre analyser ut fra egne preferanser. I forhold til et GIS, som ofte krever spesialkompetanse, har applikasjonen et effektivt og lettforståelig brukergrensesnitt, og brukerterskelen for å utføre analysene senkes.

Vi så i kapittel 2 at multikriterieanalyser skal presentere et sett med alternativer til beslutningstaker. Resultatene fra snøstabilitetsmodellen framhever konkret informasjon om hvilke skredbaner som har ustabil snødekke. I henhold til klassifisering av Chakhar et al. (2007) gir dette et sett med diskrete alternativer. Samtidig vises stabiliteten for hele området som kontinuerlige alternativer i henhold til samme klassifisering. Snøstabilitetskartet produserer på denne måten flere alternativer, både diskrete og kontinuerlige, til å støtte varslingsprosessen.

Resultatene fra multikriterieanalysene skal i tillegg «hjelp beslutningstakeren [...] til å velge det 'beste' alternativet fra et visst antall mulige valg [...]» (Jankowski 1995). Chakhar et al. (2003) hevder at GIS alene mangler muligheter for å vurdere et sett med ulike alternativer

eller scenarier. Applikasjonen i vår studie støtter på en enkel måte testing av forskjellige scenarier for snøstabilitet. Scenariene kan styres i brukergrensesnittet ved å endre på parametre og ved å bruke muligheter for simulering av de meteorologiske variablene.

Dette kan også kjøres automatisk, slik at snøstabiliteten beregnes med et sett av ulike parametre. For eksempel kan stabiliteten beregnes for (i) værprognosens nedbørsverdi, (ii) en dobling av nedbør i forhold til prognosen og (iii) en dobling av nedbør kombinert med sterk vind. Ved å sammenlikne alternativene, får beslutningstaker flere scenarier å forholde seg til, fra antatt situasjon til «worst case scenario». På denne måten skaper den valgte metoden muligheter innen multikriterieanalyser som vi ikke oppnår med GIS alene.

GIS-komponentene i applikasjonen gjorde de romlige analysene av snøstabiliteten mulig. I tillegg kan GIS brukes til å vise resultatene på ulike måter, både som rasterdata til videre bruk, som kart og som animasjoner. Den implementerte applikasjonen kan imidlertid ikke betraktes som et fullstendig verktøy for multikriterieanalyser. For en hensiktsmessig framstilling av alternativene, bør resultatene vises direkte i applikasjonen. Det finnes muligheter innen utviklingsverktøy til å presentere resultatene interaktivt ved hjelp av kart, noe Karnatak et al. (2007) gjør i sin studie ved hjelp av en GIS-applikasjon på Internett. Generelt sett inneholder det utviklede verktøyet lite funksjonalitet utenom kjøring av de romlige analysene, og det finnes ingen mekanismer for videre evaluering av resultatene.

Implementasjonen utvider likevel mulighetene i forhold til et reint GIS, og erfaringene støtter forskjellene som Karnatak et al. (2007) beskrev mellom mulighetene i et GIS og de ekstra mulighetene som multikriterieanalyser gir:

- GIS-komponenter står for dataervervelse, -lagring, -gjenbruk og -analyse.
- Multikriterieanalyser-verktøy gir i tillegg muligheten til aggregering av romlige data og produksjon av alternativer basert på beslutningstaker preferanser.

Til tross for at den implementerte løsningen ikke er et fullverdig multikriterieanalyseverktøy, tyder dermed resultatene på at løsningen tar de romlige analysene et steg nærmere beslutningstakeren. Alternativene som presenteres av denne studiens modell, for eksempel snøstabilitetskartet og animasjoner, er resultater som enkelt kan tolkes og benyttes til å for å sette i gang mottiltak. Brukterskelen for applikasjonen er trolig lavere enn for et GIS, da det

ikke er behov for avansert GIS for å kjøre applikasjonen. Gomes et al. (2002) mener begrensningene i GIS fører til at «vekselvirkningen mellom analytikere og beslutningstakeren skjer utenfor GIS-miljøet». Ved å etablere et interaktivt multikriterieverktøy med kartvisning og GIS-muligheter, kan derimot de romlige aspektene bli en del av beslutningsprosessen.

5.1.1 Implementering i et varslingsystem

Selv om resultatene virker lovende, er det flere forbehold som må tas ved en eventuell implementering av multikriterieanalyser i et varslingsystem. Multikriterieanalyser i studien har flere begrensninger og ufullkommenheter som kan være gyldige for seinere bruk av multikriterieanalyser. Hvis disse kan overkommes, bør resultatene kunne støtte vurderingene som tas i et varslingsystem. I følge LaChapelle (1980) minsker usikkerheten i snøskredvarsling ved redundant informasjon, og innføring av nye estimer, som for eksempel resultatene fra snøstabilitetsmodellen, bør bidra til mer pålitelige vurderinger.

En av de viktigste begrensningene til den implementerte løsningen er bruken av forenklede modeller. Selv om mer realistiske modeller kan forbedre prognosene for snøstabiliteten, vil det være vanskelig å få gode resultater ved kun å bruke meteorologiske variabler i vurdering av snøens stabilitet. Fra andre studier vet vi at meteorologiske faktorene har stor usikkerhet (høy entropi) i forhold til snøskred. Av de tre klassene som McClung (2002) deler faktorene i, er snø- og meteorologiske faktorer den med høyest entropi. Likevel har faktorene fordelene av vanligvis å være numeriske verdier, og dermed lettere å bruke i kartalgebra.

Andre faktorer med mindre usikkerhet vil derfor kunne gi sikrere indikasjoner på ustabilitet. Snødekkefaktorene kan også vurderes i numerisk modellering, som blant annet i SNOWPACK-modellen (Lehning et al. 1999). Dette involverer derimot en mer kompleks modellering. De faktorene med lavest entropi, stabilitetsfaktorene, er de som derimot oftest er ikke-numeriske.

Eksisterende varslingsystemer tar derimot ofte for seg disse faktorene, og utnytter samtidig kunnskap hos fagekspertene. I forhold til bare å bruke snø- og værfaktorer, vil multikriterieanalysene kunne gi bedre resultater ved å inkludere disse faktorene. Analysene vil likevel ikke kunne ta inn alle faktorene som er nødvendige for å forutse snøskredfare, og

dermed ikke kunne gi fullverdige skredvarsler. I stedet kan metoden inngå som en del komponent i et varslingsystem.

For å inngå i et varslingsystem, er flere praktiske forhold som må avklares. Et av disse er forkorting av applikasjonens analysetid. Resultatene bør foreligge innen rimelig tid før de skal brukes, for eksempel ved å utføre analyse automatisk slik at resultater er klare før beslutninger tas i varslingsystemet. For å få til varslingsystemets tidskrav, må derfor analysetida til applikasjonen reduseres. Det er flere muligheter for å oppnå dette, for eksempel gjennom parallell kjøring av modeller eller effektivisering av modellene.

Et eksempel på samkjøring er å integrere studiens applikasjon inn i NGIs varslingsystem for snøskredfare. Hvis analysetida kan reduseres til under 2 timer, vil snøstabilitetsindeks basert på meteorologiske prognoser fra kl 06:00 foreligge før NGIs morgenmøte kl 08:00. Hvis ikke dette er oppnåelig, kan delresultater publiseres underveis, noe vi kommer tilbake til seinere (kapittel 5.1.3). Dermed vil det ikke nødvendig å vente på at hele analysen er ferdig før resultatene for de første dagene foreligger.

Dagens skredvurdering ved NGI krever dessuten at snøskredfaren vurderes på nytt om ettermiddagen ved behov. Snøstabilitetsmodellen tillater dette ved at den blir kjørt flere ganger om dagen for å oppdatere stabilitetsindeksen. Dette gjør skredexpertene i stand til å fange opp kritiske endringer i snøstabiliteten umiddelbart. Størst effekt kan dette gi hvis snøstabiliteten beregnes hver gang nye meteorologiske prognoser publiseres, slik at eventuelle endringer blir oppdatert så fort som mulig.

Den temporale oppløsningen av dataene er forskjellig fra de meteorologiske datakildenes temporale oppløsning. Mens prognoser lages for hvert døgn opp til 10 døgn fram i tid, har yr.no 4 varsler i døgnet for de 5 første dagene. Antallet prognoser kan økes til for eksempel 4 per døgn, men informasjonsmengden vil samtidig øke kraftig. Trolig ville forskjellen mellom hver prognose vært for små. Det er derfor ikke funnet nødvendig med høyere temporal oppløsning på stabilitetsprognosene.

Multikriterieanalysene i denne studien ble tilpasset til bruk for studieområdet.

Implementasjon av en snøstabilitetsmodell for andre områder enn opprinnelig tenkt fordrer

spesiell oppmerksomhet. Utfordringer knyttet til dette er blant annet utdypet av Haraldsdottir et al. (2004), som påpeker viktigheten av å tilpasse modellene til lokale forhold. Studien viser til erfaringer fra Island i bruk av modellkjeden Safran-Crocus-Mepra, som var laget for forhold i Alpene. Manglende tilpasninger til lokale forhold for den ene modellen kan ha bidratt til redusert kvalitet på resultatene.

Lokale tilpasninger ble gjort i denne studien ut fra kjennskap til området, jf. feltbeskrivelsen i kapittel 3. Vi antok for eksempel at snøskredaktiviteten i Strynefjellet hovedsakelig oppstår under eller rett etter perioder med kraftig vind og nedbør (Kronholm et al. 2006). Modellen betrakter derfor kun snøfall de siste 5 dagene. En annen lokal tilpasning er metoden for å modellere temperaturavhengig stabilisering. I delmodellen antar vi en stabilisering av snøen etter tre sammenhengende dager med temperatur over 0 °C. Begge antakelsene vil derimot ikke nødvendigvis kunne overføres til andre områder.

Flere hensyn kreves derfor for gjenbruk av modellen i andre områder. Først og fremst er det nødvendig å innhente kunnskap om klimatype og type skredaktivitet i området, og justere snøstabilitetsmodellen i forhold til dette. I områder med kontinentalt klima vil for eksempel skredaktiviteten utenom snøstormer være større enn for studieområdet maritime klima, og en modell for å beskrive metamorfosen i snødekket kan være nødvendig. Generelt vil tilpasningen til nye områder kreve innføring av nye faktorer, delmodeller og variabler, samtidig som vektinga mellom de ulike faktorene må oppdateres.

Manglende tilgang til data kan hindre implementasjon av snøstabilitetsmodell i andre områder. Terrengmodellen og de meteorologiske prognosene som ble brukt i prosjektet har dekning for hele Norge, og for mange andre områder i landet vil det være tilgang til meteorologiske observasjoner fra nærliggende værstasjoner.

Å skaffe datasett som representerer skredbaner vil ofte være vanskeligere, men simple skredbanedata kan i Norge produseres basert på landsdekkende data. For gjenbruk av modellen i områder utenfor Norge kan derimot mangel på data være hindring. I fjerne fjellområder i andre deler av verden kan mangel på passende terrengmodell av god kvalitet og oppløsning redusere nytten eller umuliggjøre implementasjon av modellen.

Til tross for begrensningene i modellene og dataene, indikerer resultatene på at multikriterieanalysene kan inngå som en komponent i et varslingsystem. Vi så i kapittel 2.5 at Einstein et al. (2007) vurderer seks kritiske elementene i et varslingsystem. Av våre erfaringer kan vi anta at multikriterieanalysene kan støtte flere av disse elementene:

1. Situasjon som kan forårsake faren kan identifiseres ved hjelp av meteorologiske data og prognoser.
2. Snøstabilitetsmodellen kan gi støtte til tolkninga av den romlige informasjonen.
3. 10-dagersprognosene kan gi informasjon til initiell varsel.
4. Informasjonen kan oppdateres underveis ved nye observasjoner og modellkjøringer.
5. Resultatene fra oppdateringene bidrar til oppdatering av varsler.
6. Resultatene fra snøstabilitetsmodellen sammen med et GIS kan benyttes i vurderingene av mottiltak, for eksempel for å identifisere baner hvor kunstige skred bør utløses.

5.1.2 Vurdering av analysenes validitet

For å vurdere realismen av resultatene fra snøstabilitetsmodellen, ble resultatene sammenliknet med de meteorologiske prognosene og med eksisterende snøskredvarsler ved NGI (kapittel 4.4). Varslinga ved NGI utføres hver morgen av skredeksperter for en rekke områder i Norge. Mens snøstabilitetsmodellen viser variasjonen i stabiliteten ved å angi snøstabilitetsindeks, angir varslene fra NGI normalt ikke skredfaren for hver enkel skredbane. Snøstabilitetsmodellen beregner derimot stabiliteten for hver enkel celle, og denne verdien brukes i beregning av hver banes stabilitet.

Sammenlikningen av skredvarslene og snøstabilitetskartet i kapittel 4.4.9 tyder på at snøstabilitetsmodellen har potensiale til å indikere ustabilitet mer detaljert og med høyere oppløsning enn dagens varsler. Samtidig framkommer noen av snøstabilitetsmodellens svakheter, mange av dem som følge av forenklinger og antakelser. Blant annet ble skjærstyrken holdt konstant i hele studieperioden. Ved bruk i et varslingsystem kan verdien legges inn manuelt basert på fageksperters erfaringer og på observasjoner av snølaget i området. Andre forenklinger, som temperaturavhengig stabilisering, kan også erstattes av mer realistiske modeller.

En vesentlig forskjell mellom NGIs varsler og snøstabilitetsmodellen er at NGI inkluderer manuelle vurderinger. NGIs varsler tar på den måten hensyn til flere faktorer med lavere

entropi. Eksempelvis ble det 19. februar vurdert at «[s]tabiliteten i snødekket vil tilta i løpet av dagen på grunn av de synkende temperaturer». Ved å følge teorien om entropi beskrevet av LaChapelle (1980)., gjør dette at NGIs skredvarsler kan med større sikkerhet knyttes til skredaktivitet.

Sammenlikningen av prognosene fra multikriterieanalysene mot snøskredvarslene fra NGI (4.4.9) viser at resultatene samsvarer relativt bra. En av grunnene til dette er at begge metodene inkluderer nedbør som en kritisk faktor. For eksempel ble den varslede nedbøren 17. - 18. februar utslagsgivende for å anta redusert stabilitet for begge metodene. Det er likevel en del forskjeller mellom resultater fra de to metodene. Mens multikriterieanalysene bruker alle prognosene som publiseres på yr.no, tyder den tekstlige vurderinga i NGIs varsler på at kun prognoser 1-2 dager fram i tid benyttes. Multikriterieanalysene kan dermed publisere prognoser for 10 dager fram i tid, mot NGIs ene.

Resultatene viser derfor at realistiske resultater kan forventes. Blant annet varsles redusert stabilitet i studieperioden på grunn av kraftig nedbør på forhånd ved hjelp av snøstabilitetsmodellen (kapitlene 4.4.3 - 4.4.8). Allerede i prognoser produsert 13. februar forventes lav stabilitet 18. februar, det vil si fem dager før en eventuell endring i situasjon. Samtidig er det – som forventet – en markant kobling mellom de meteorologiske prognosene og snøstabilitetsprognosen. Konsekvent medfører varslet nedbør for en dag lave stabilitetsprognoser de påfølgende dagene. Denne avhengigheten også kan identifiseres ved manuelle analyser av værvarsler, men snøstabilitetsmodellen gjør analysene automatisk, og resultatene er tilgjengelige kort tid etter at værprognosene er publisert.

Fra snøstabilitetskartene ser vi også hvordan ustabile skredbaner kan identifiseres ved hjelp av snøstabilitetskartet. Datasettenes oppløsning er dermed høy nok til at stabilitet for hver skredbane kan beregnes. Variasjonen innenfor en enkel skredbane kommer tydelig fram ved at hver enkel celle i skredbanen får en verdi for stabilitetsindeksen. Bruk av terrengmodell med høy oppløsning viser seg derfor å kunne gi nok detaljer til å kunne vurdere stabiliteten for hver enkel skredbane.

Dette sier derimot ikke noe om påliteligheten til resultatene. Snøstabilitetsmodellens kvalitet avhenger blant annet av datagrunnlaget, og usikkerheten i de meteorologiske dataene er kritisk. Sammenlikningen av observasjonene ved flere værstasjoner viser at variasjonen kan være stor innenfor korte avstander, og dermed ikke enkel å modellere. I tillegg blir resultatene feil når kommunikasjonen med værstasjonen svikter, slik som 18. februar (kapittel 4.4.7).

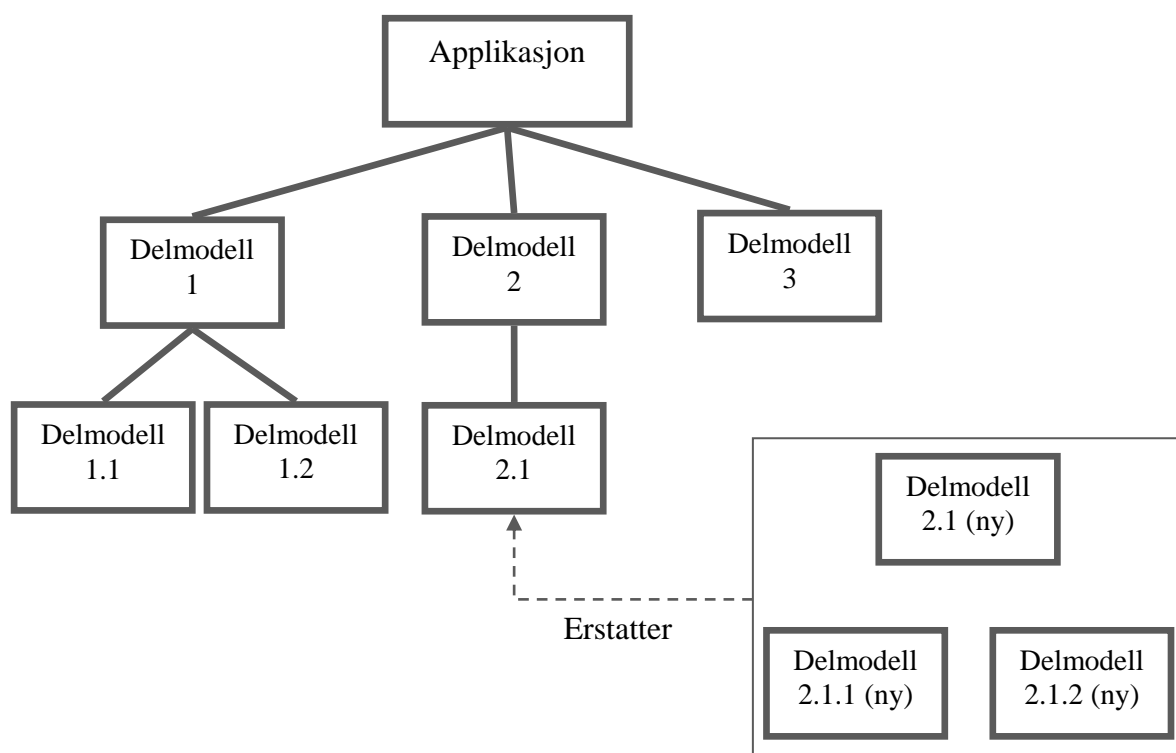
For meteorologiske prognoser er mengden data for studieperioden for liten til å gi en tilfredsstillende analyse av pålitelighet. Analysene i kapittel 4.4.1 viste likevel lav korrelasjon mellom de meteorologiske prognosene og observasjonene. Studien av to tilsvarende værmodeller som ble foretatt av Roeger et al. (2001), tyder på at påliteligheten til prognoser synker med tid, selv for 24-timers og 48-timers varsler. Prognoser fra snøstabilitetsmodellen vil trolig reduseres kraftig utover i 10-døgnsperioden, og med spesiell stor usikkerhet for den siste delen av perioden. NGIs varsler baserer seg derimot på mer pålitelige meteorologiske prognoser for de nærmeste dagene. Snøstabilitetsmodellens varsling av forverringen av stabiliteten fem dager på forhånd tyder likevel på et potensiale for å bruke prognoser noe fram i tid, og Srinivasan et al. (2005) anbefaler bruk av prognoser 3 dager fram i tid for snøskredvarsling.

Selv med datagrunnlagets usikkerhet - både mht. observasjoner og resultater – og modellens begrensninger, viser resultatene derfor at multikriterieanalyser kan gi realistiske prognoser for snøstabilitetsindeksen.

5.1.3 Systemvalg

Bakgrunnen for å implementere analysene gjennom en egen applikasjon var ønsket om fleksibilitet, struktur og muligheter for kompleks sammensetning av modeller, for eksempel ved bruk av løkker. Det ble valgt å dele applikasjonen i to lag. Lagdeling, også kalt «layered architecture», er en logisk strukturering av applikasjoner som ofte er brukt i systemutvikling (Larman 2004). Det to lagene kommuniserer gjennom veldefinerte grensesnitt, noe som gjør applikasjonen mer robust og fleksibel. Ved større datamengder og mer kompleks dataflyt kan applikasjonen inkludere et eget lag for håndtering av data, og dette bør vurderes i en eventuell implementasjon i et varslingssystem.

Fleksibiliteten understrekes også ved måten delmodellene ble organisert. Applikasjonen benytter mange delmodeller, som selv kan bestå av flere andre delmodeller. Inndeling gjøres helt til hver modell kan løses ved å bruke enkel GIS-funksjonalitet. Eksisterende delmodeller kan erstattes av nye delmodeller, noe som gir muligheten til å introdusere nye og forbedrede modeller i systemet. For å introdusere mer kompleksitet i snøstabilitetsmodellen, kan en enkeltstående delmodell erstattes av flere undermodeller (Figur 5-1). Hvis den nye, komplekse delmodellen tar de samme parametrene og gir samme type resultat, vil ikke de andre modellene måtte endres, hvis ikke, kreves en endring av klassenes grensesnitt. .



Figur 5-1 Eksempel på erstatning av delmodell med mer kompleks modell

I noen tilfeller er det implementert flere alternative delmodeller. Valg av delmodell blir da styrt i brukergrensesnittet. Brukeren kan for eksempel velge å bruke interpolasjonsmodeller for meteorologiske prognoser ved å huke av et avkrysningsfelt. Dette forenkler testing av modellen og introduserer fleksibilitet i utførelsen av modellen.

Noen av valgene som ble tatt i applikasjonen har gitt negative konsekvenser. Som vi så i forrige kapittel er lang analysetid grunnet tidkrevende modeller en av de store utfordringene.

Applikasjonen kjører et stort antall delmodeller, og flere tusen filer produseres for hver modellkjøring. Under implementasjonen ble det foretatt flere endringer av applikasjonen og delmodeller for å øke ytelsen. Likevel var fortsatt analysetida over 4 timer i studieperioden.

Dette kan delvis løses ved at modellene kjøres sekvensielt. Dermed blir analysene for den første dagen publisert før analysene for de resterende dagene begynner. De første resultatene foreligger normalt etter 1,5 time. I kapittel 4.2.2 viste vi at analysetida også kan reduseres ved å velge et mindre område. Vi så samtidig at ekskludering av uaktuelle områder ikke reduserte analysetida. Å redusere størrelsen på studieområdet kan derfor bare i begrenset grad redusere analysetida. Analyser av en skredbane gir bare en tredjedel reduksjon i forhold til å analysere hele området.

Større gevinst oppnås trolig ved effektivisering av programmeringslogikken og modellene. Nullstillingsmodellen tar for eksempel en stor andel av den totale analysetida. En effektivisering av denne vil redusere analysetida kraftig. Alternativt kan andre framgangsmåter for stabilisering av snødekket erstatte den som ble implementert i studien.

Det finnes også muligheter for å få ned analysetida ved oppjustering av maskinvare. Applikasjonen ble kjørt på en vanlig kontor-PC sammen med andre applikasjoner, jf. Vedlegg H. En kan forvente at analysetida reduseres ved å kjøre modellen på en raskere PC eller på en server. Dette kan brukes i kombinasjon med effektivisering av prosessorbruken. I et operativt system kan parallell prosessering nyttiggjøres, det vil si at applikasjonen kjører flere prosesser samtidig. Dermed kan delmodeller som er uavhengige av hverandre kjøres parallelt, noe som gir mer effektiv bruk av både prosessorer og minnet på maskinene.

Kommunikasjonssvikt mot datakildene på Internett er en annen kritisk svakhet. Vi har sett et tilfelle der kommunikasjonen mot observasjonsdataene fra fonnbu.no var nede, noe som førte til konsekvenser for snøstabilitetsindeksen for den dagen. Prognosene fra yr.no var i tillegg nede i noen få tilfeller i studieperioden. Dette resulterte i en mer kritisk svikt som førte til at modellen ikke kunne fullføres. Kommunikasjonsfeilene ble oppdaget i applikasjonen ved hjelp av gjennomgang av resultater og loggfiler. I en operativ applikasjon vil normalt egne feilhåndteringsrutiner etableres for automatisk oppdage feilene og sette i verk mottiltak. Ideelt sett bør applikasjonen inneholde definisjoner av alternative datakilder som kan erstatte de som

mangler. Durand et al. (1993) beskriver en framgangsmåte for dette som er implementert i SAFRAN-CROCUS-MEPRA, hvor data fra andre kilder hentes når det meteorologiske nettverket er nede.

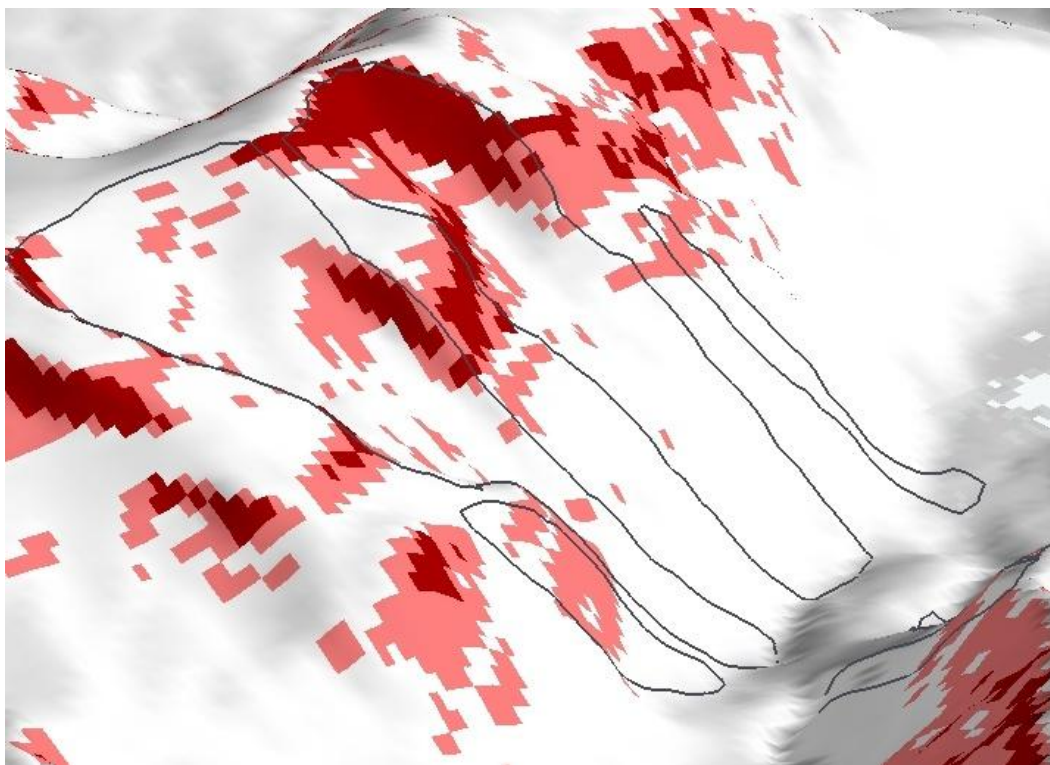
Vi har også sett på utfordringer i forbindelse med behov for diskplass og antall filer. Selv om resultatfilene fra modellene krever noe diskplass, gjør sletting av midlertidige filer at diskplassen som kreves er overkommelig. For hele vintersesongen vil resultatfilene trolig bare utgjøre i overkant av 150 GB, noe som er håndterbart med dagens teknologi. For anvendelse av modellene i flere områder eller over større områder må likevel filstørrelsen tas hensyn til. Filstrukturen i den implementerte løsningen er enkel; resultatene deles i to hovedkataloger, en for midlertidige filer og en for permanente filer. En operativ løsning kan gi et stort antall filer, og analysene vil da kreve en mer strukturert lagring, for eksempel i en database.

5.1.4 Presentasjon og dokumentasjon

Resultatene fra snøstabilitetsmodellen skal videredistribueres, og en hensiktsmessig presentasjon er viktig for effektiv kommunikasjon av snøstabilitetsindeksen. Kartografi må være enkel å tolke for brukerne. Ofte betyr dette at en bruker kartografi som er brukeren er kjent med fra før av. I noen tilfeller vil det være aktuelt å bruke kartografi fra internasjonale standarder.

Det finnes også nyere måter å presentere resultatene på. I kapittel 4.2.3 så vi et eksempel på hvordan resultatene kan presenteres som en animasjon. Animasjon er ofte en presentasjonsmetode som er godt egnet til temporale data, og bør vurderes som viktig tilleggsinformasjon til statiske kart. Andre metoder inkluderer 3-dimensjonale visninger av kartene, som kan støtte analysene av resultatene (Figur 5-2).

Dokumentasjon av resultatene er viktig, og Köhler et al. (2006) konstanterer at god metadata kreves for å kunne vurdere dataenes anvendelighet og kvalitet. For inndataene kreves det derfor at modellen klarer å innhente og håndtere informasjon om datasettets kvalitet. Dette fordrer at metadataene er velstrukturerte og at det dermed er mulig for applikasjonen å lese kvalitetsverdiene. Verken de meteorologiske observasjonene eller prognosene inneholdt informasjon om kvaliteten.



Figur 5-2 Eksempel på 3-dimensjonal presentasjon av stabiliteten laget i ArcGIS-programmet ArcScene.

Samtidig må kvaliteten på resultatene fra snødriftsmodellen dokumenteres. Generelle kvalitetsmål og kritiske faktorer som påvirker kvaliteten bør publiseres sammen med dataene. Vi så tidligere at manglende observasjonsdata for en dato førte til feil i snøstabilitetsindeksen, og denne type feil må komme klart fram i dokumentasjonen.

Dokumentasjonen bør inngå som en del av metadataene til modellen. Her kan også annen informasjon som er relevant for bruken inkluderes. Dette kan være bruksrestriksjoner og dekningsområde. Dermed vil brukerne kunne vurdere om dataene egner seg til den ønskede oppgaven. Som Köhler et al. (2006) bemerker, bør metadataene publiseres i henhold til nasjonale eller internasjonale standarder for å sikre god kommunikasjon av informasjonen.

5.1.5 Etikk

Vi har argumentert for at formålet med en operativ snøstabilitetsmodell først og fremst er å bistå i varslingsprosessen, og ikke å produsere ferdige varsler. Modellen gir estimater på snøstabilitet basert på numeriske analyser, og baserer seg på et utvalg av faktorer og kriterier, og fageksperters vurderinger er nødvendige for tolkinga.

Det er derfor flere problemstillinger som oppstår hvis dataene publiseres til andre. Områdene som stabiliteten beregnes for kan inkludere eiendommer, bygninger og infrastruktur.

Publisering av stabilitetsdata som ikke er kvalitetssikret kan få uheldige konsekvenser for de berørte. For eksempel kan eiere få verdien av eiendom redusert ved vedvarende lav stabilitet. Modellen kan også vise god stabilitet i områder som har en reell skredfare, hvorpå erstatningsansvar kan bli aktuelt ved ulykker.

Det kan imidlertid hende at en ønsker å dele resultatene med andre miljøer, for eksempel for bruk i andre modeller. I så fall vil god dokumentasjon av resultatene måtte følge resultatfilene. Dette krever imidlertid at mottaker har god kunnskap om resultatene og deres usikkerhet. Hensyn til dataenes sensitivitet i forhold til berørte parter bør uansett vurderes, og for en operativ løsning bør sikkerhetstiltak innføres for å sikre dataene fra å bli distribuert til uvedkommende.

I tillegg til sikkerhetsvurderinger, bør en implementasjon av snøstabilitetsmodellen i et varslingsystem vurderes opp mot andre etiske problemstillinger. Stefanovic (2003) trekker inn filosofiens bidrag til vurderinger av naturfarer. Hun argumenterer for at en «mer omfattende forståelse av menneskelige faktorer – verdier, antakelser atferd – er sentralt for å ta en klokere [...] avgjørelse» (Stefanovic 2003). Blant annet viser hun hvordan verdier og tankemønstre kan påvirke både metodene som brukes, beslutningene som tas og mottiltakene som igangsettes. Selv modeller, argumenterer hun, gir ikke objektive resultater, men de kan likevel være nyttige hvis deres begrensninger anerkjennes og tas høyde for.

Vi kan overføre Stefanovics tanker til snøskredvarslings; det kan for eksempel være smartere å tilpasse seg naturfarene, for eksempel ved å unngå utbygging i snøskredfarlig områder, enn å forsøke å varsle farene. Selv om videre forbedringer av snøstabilitetsmålinger er ønskelige, kan det å ta hensyn til de menneskelige faktorene som Stefanovic diskuterer, bidra til en mer helhetlig forståelse av snøskredfaren.

5.2 Forslag til forbedringer i datagrunnlaget

Datasettene til bruk i modellen ble valgt ut fra entropi og tilgjengelighet. Analysene og resultatene fra studien tyder på at datasettene egnet seg i ulik grad. Valgene av datasett er

derfor kritisk i snøstabilitetsmodellen. Vi skal her diskutere hvor godt egnet de valgte datasettene er i forhold til bruk i modellen. Vi ser deretter på alternative til datasettene og eventuelt nye variabler som kan inngå i modellen. Til slutt beskrives to forslag som kan øke kvaliteten på snøstabilitetsmodellen, nærmere bestemt forbedring av skredbanedatasettet og ekskludering av bratte helninger.

5.2.1 Vurdering av datagrunnlag

Terrengparametre inngår som et kritisk datasett i de fleste delene av multikriterieanalysene. Valget av terrengmodellen ble gjort basert på oppløsning og tilgjengelighet. For andre områder kan bedre terrengmodeller være tilgjengelige, for eksempel langs Bergensbanens trasé. Resultatene fra studien tyder likevel at oppløsningen var tilfredsstillende for våre analyser. Detaljgraden er stor nok til å få en god representasjon av skredbanenes særtrekk, og vi har sett i analysene at enkeltceller med stor helning kan føre til lav stabilitet for en hel skredbane.

Høyest mulig oppløsning er likevel ikke et alltid optimalt, da det for eksempel gir større datafiler og resultatfiler. Dette vil føre til tyngrer analyser, lengre analysetid og økte krav til lagringskapasitet. Terrengmodellenes kvalitet kan også variere, og bør vurderes.. Standardavviket på den terrengmodellen som ble valgt i studien er 4-6 meter, og i kapittel 4.3.5 så vi at snøstabilitetsindeksen kunne være sensitiv overfor feil av denne størrelsen. Sensitiviteten overfor feil og konsekvenser på resultatene kan derfor være vesentlig ved valg av terrengmodell.

Terrengmodellens oppløsning må vurderes opp mot oppløsningen for de meteorologiske variablene, og hvor bra de kan modelleres for området. Hvis de meteorologiske variablene ikke kan modelleres til en tilfredsstillende detaljgrad, vil resultatene bli dårlige selv med en høyoppløselig terrengmodell. Høyest mulig oppløsning er derfor ikke nødvendigvis et optimalt kriterium i alle situasjoner.

Observasjoner er i, motsetning til terrengmodellen, punktdata. For observasjoner er det viktig at værstasjonene er plassert i et område med mest mulig like meteorologiske forhold som i skredenes utløsningssoner. I kapittel 4.4.1 så vi at to stasjoner i samme området kan ha store meteorologiske forskjeller. Noen erfaringer om sammenhengen mellom plassering av

værstasjoner og vær situasjonen i utløsningssonene kan hentes fra studien av Roeger et al. (2003). Mens en av værstasjonene i studien lå beskyttet til i skogen, var de andre plassert på utsatte steder på fjelltopper. Artikkelen konkluderer med at ingen av disse nødvendigvis representerer forholdene ved utløsningssonene. En værstasjon som ligger beskyttet opplevde mindre vindhastigheter enn utløsningssonene, mens de på fjelltoppene opplevde høyere vind enn utløsningssonene i lesiden av fjellet.

Denne studiens valg av værstasjoner er ikke ideelle. Værstasjonen ved Fonnbu, som ble brukt som værstasjon i studieperioden, ligger i dalbunnen, ca 930 moh. De fleste utløsningssoner for snøskred er derimot nære fjelltoppene. Observasjonene fra Fonnbu er derfor ikke nødvendigvis representable for utløsningssonene. Spesielt gjelder dette vindkomponentene, siden vindretningen er avhengig av topografiske forhold og vindhastighetene er lavere i dalbunnen enn i utløsningssonene.

Værstasjonen på Kvitenova er plassert ved fjelltoppen, ca 1400 moh. Ut fra egenskapene til skredbanene, har Kvitenova sannsynligvis meteorologiske forhold som er mer lik de fleste av skredbanene, jf. oversikten over skredbaner i Vedlegg F. Likevel må også data fra denne stasjonen brukes med forsiktighet. Stasjonen ligger ubeskyttet ved fjelltoppen, og vindhastigheten her vil normalt være vesentlig større enn i området rundt.

I motsetning til observasjonene fra Fonnbu, som var lett tilgjengelige, var observasjonene fra Kvitenova bakt inn i dynamiske html-sider, og dermed vanskelige å hente inn (Figur 5-3). Programmering mot html-sider vil være vesentlig vanskeligere og dessuten mer sårbar mot endringer på nettsidene. Derfor brukes Fonnbu-dataene til tross for fordelene med å bruke data fra Kvitenova. Ved publisering av strukturerte datafiler kan Kvitenova erstatte Fonnbu som valgt værstasjon.



Figur 5-3 Webside for observasjoner fra Kvitenova. URL: <http://vegklima.vegvesen.no/>.

Selv om observasjonene fra værstasjonene ikke er representable for vær-situasjonen for utløsningssonene, kan modellering av observasjonsdataene for områdene gi gode resultater. Observasjoner fra værstasjoner på fjelltopper kan for eksempel reduseres i forhold til høyde og fjelltoppenes utsatthet. Dette ble blant annet gjort av Stocker-Mittaz (2001), som beregnet vindhastigheten i fjellterreng ut fra observasjoner på fjelltopper ved hjelp av å redusere vindhastigheten først med 30 %, og deretter med 40 % per 1000 høydemeter:

$$U = 0,7 u_{xy} (1 - 0,0004 (h_{xy} - h)) \text{ (Formel 13)}$$

hvor u_{xy} er vindstyrken på fjelltoppen med høyde h_{xy} , og h er høyde i utløsningssonen. Denne formelen vil beregne vindhastigheten ved Fonnbu (930 moh.) til 57 % av vindhastigheten på Kvitenova (1400 moh.). En enkel vurdering viser at denne stemmer bra med observasjonene i studieperioden, da vindhastighetene ved Fonnbu i gjennomsnitt lå på 50 % av Kvitenovas. Denne type tilnærminger kan inkluderes i multikriterieanalysene for å få en forbedret representasjon av vær-situasjonen ved utløsningssonene, men på grunn av de store variasjonene i meteorologiske forholdene i fjellklima bør dette gjøre med forsiktighet.

Som for observasjonsdataene, ble datakilde for meteorologiske prognoser først og fremst valgt ut fra tilgjengelighet. Valget falt på webtjenesten yr.no, som ble etablert sommeren 2007. Tjenesten har to vesentlige fordeler; for det første er den tilgjengelig over Internett, og

for det andre publiserer den data på XML. Dette gjør det mulig å gjenbruke dataene i applikasjoner som ikke støtter meteorologiske dataformater.

Yr.no har imidlertid en del svakheter i forhold til bruk i snøstabilitetsmodellen. Nytteverdien hemmes på grunn av visse begrensninger. Tjenesten inneholder data for vindhastighet, vindretning, nedbør og temperatur, men mangler andre relevante data som solstråling og skydekke. Ei heller eksisterer det metadata for data eller for selve webtjenesten. Situasjonen bedret seg noe da en tekstlig beskrivelse av datafeltene i XML-filene ble publisert. Selv om dette ga noe av de ønskede metadataene, ville det vært ønskelig med en formell og strukturert definisjon.

Ideelt sett burde dataene og datastrukturen blitt beskrevet ved hjelp av metadata og et XML-skjema. Disse kan publiseres sammen med dataene. Manglende metadata førte i studieperioden til usikkerhet med tanke på enkelte datafelt og til datasettenes tidsgyldighet. Dataene burde deles inn etter type tidsdefinisjon; tidspunkt for temperatur, vindretning og vindhastighet, og tidsperioder for nedbøren, da den inneholder akkumulerte verdier over tid. Tjenesten fra yr.no publiserer derimot alle prognosene som 6-timersperioder. Problemet har delvis blitt løst ved innføringa av tidsdefinisjonen som kommentarfelt i XML-fila, men tidsdefinisjonene bør inkluderes som ekte attributter sammen med dataene.

Ellers viste studieperioden at tjenesten var stabil, selv om statistikk om oppetid for tjenesten ikke er kjent. Det har blitt gjort noen mindre endringer på tjenesten, men konsekvensene for applikasjonen har vært små. Større endringer som omstrukturering av XML-profilen kommer trolig til å unngås for å skåne kundenes applikasjoner. Dette fører imidlertid til at de forbedringer som ønskes i snøstabilitetsmodellen trolig ikke vil bli gjennomført i yr.no. Alternative datakilder må i så fall vurderes.

5.2.2 Alternative meteorologiske datakilder

Studien brukte datasett som ble funnet tilfredsstillende for formålet under oppstart. Gjennomgangen ovenfor viser imidlertid at datasettene ikke nødvendigvis er optimale for den tiltenkte bruken. Det eksisterer imidlertid flere alternative kilder til data, både meteorologiske prognoser og observasjoner.

Tilgangen til de meteorologiske prognoser ble forenklet etter introduksjonen av webtjenesten yr.no. Mangel på struktur og metadata gjør at alternative kilder bør vurderes. Et av alternativene som finnes er en annen norsk webtjeneste, api.met.no. Tjenesten drives av met.no, i motsetning til yr.no som er et samarbeid mellom met.no og NRK. Tjenesten lar utviklere etablere kobling mellom programvare og data direkte fra met.no.

Som yr.no, publiserer api.no meteorologiske prognoser i form av XML-data. Api.met.no gir derimot programmerere tilgang til en større mengde meteorologiske data enn yr.no. Tjenesten for meteorologiske prognoser heter «locationforecast», og er en av ca. 20 webtjenester på nettstedet. Blant disse er tjenester for å hente varsel for ultrafiolett stråling og rasterbilder fra nedbørssradarer.

Bruk av fjernanalyse har blitt stadig mer aktuelt etter hvert som nye systemer og teknikker har blitt tilgjengelig. Dette utnyttes i flere systemer. Blant annet brukes data fra et stort antall satellittbaserte systemer i snø- og iskartleggingssystemet "Interactive Multisensor Snow and Ice Mapping System" (Helfrich et al. 2007). Systemet gir snødekke for den nordlige halvkule med 4 km oppløsning.

I motsetning til data fra yr.no er dataene fra api.met.no veldefinerte og godt strukturerte. Blant annet inneholder XML-filene fra api.met.no metadata om værmodellen. Api.met.no gir også en del nye dataelementer i forhold til yr.no, blant annet skydekke og lufttrykk. Disse parametrene kan bidra til forbedringer av snøstabilitetsmodellen. Varslet skydekke kan for eksempel brukes til å beregne solstråling. Forespørsler til api.met.no sendes som en URL med tre parametre; lengdegrad og breddegrad og høyde i meter over havet. Dette gjør det enklere å legge inn ønskede posisjoner enn i yr.no, hvor stedsnavn er det eneste posisjonskriteriet. Api.met.no returnerer data i henhold til en mer kompleks og innholdsrik XML-struktur enn yr.no (Figur 5-4).

Forespørsel:

http://api.met.no/weatherapi/locationforecast/1.4/?lat=61.97306;lon=7.28944;msl=0.

Resultat:

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" ?>
<weatherdata xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
xsi:noNamespaceSchemaLocation="http://api.met.no/weatherapi/locationforecast/1.4/schema"
created="2008-03-24T14:32:17Z">
  <meta>
    <model name="YR" termin="2008-03-24T00:00:00Z" runended="2008-03-24T03:16:13Z" nextrun="2008-
03-24T15:30:00Z" from="2008-03-24T15:00:00Z" to="2008-03-26T17:00:00Z"/>
    <model name="EC.GEO.0.25" termin="2008-03-24T00:00:00Z" runended="2008-03-24T07:08:39Z"
nextrun="2008-03-24T20:00:00Z" from="2008-03-26T18:00:00Z" to="2008-04-02T18:00:00Z"/>
  </meta>
  <product class="pointData">
    [...]
    <time datatype="forecast" from="2008-03-24T17:00:00Z" to="2008-03-24T17:00:00Z">
      <location altitude="840" latitude="61.9731" longitude="7.2896">
        <windDirection id="dd" deg="271.2" name="W"/>
        <windSpeed id="ff" mps="1.4" beaufort="1" name="Flau vind"/>
        <temperature id="TTT" unit="celcius" value="-7.7"/>
        <pressure id="pr" unit="hPa" value="988.8"/>
        <cloudiness id="NN" percent="78.1"/>
        <fog id="FOG" percent="0.0"/>
        <lowClouds id="LOW" percent="5.4"/>
        <mediumClouds id="MEDIUM" percent="71.7"/>
        <highClouds id="HIGH" percent="0.0"/>
      </location>
    </time>
    [...]
    <time datatype="forecast" from="2008-03-24T16:00:00Z" to="2008-03-24T17:00:00Z">
      <location altitude="840" latitude="61.9731" longitude="7.2896">
        <precipitation unit="mm" value="0.0"/>
      </location>
    </time>
    [...]
    <time datatype="forecast" from="2008-03-24T17:00:00Z" to="2008-03-24T20:00:00Z">
      <location altitude="840" latitude="61.9731" longitude="7.2896">
        <symbol id="SNOW" number="13"/>
      </location>
    </time> [...]
  </product>
</weatherdata>
```

Figur 5-4 Utdrag fra et resultat fra «locationforecast», api.met.no. Aksessert 24. mars 2008 kl 15:30.

En kort sammenlikning tyder på at det er flere fordeler med å bruke api.met i stedet for yr.no (Tabell 11). Resultatet fra api.met.no inneholder prognoser for hver time. Api.met.no gir flere meteorologiske variabler og bedre tidsdefinisjoner. Generelt inkluderer api.met.no flere dataelementer og metadataelementer enn yr.no. Derimot gir yr.no tekstlige varsler som er utarbeidet av meteorologer for det aktuelle området sammen med prognosene. Api.met.no tilbyr tekstvarsler ved hjelp av en annen webtjeneste, tjenesten «Textforecast».

Tabell 11 Sammenlikning av yr.no og api.met.no

	yr.no	api.met.no
Serverplassering	NRK	met.no
Modell	HIRLAM 8	HIRLAM 8
Romlig oppløsning	8x8 km. Temperaturgradient brukes for å beregne lokal temperatur.	8x8 km. Temperaturgradient brukes for å beregne lokal temperatur.
Tidsangivelse	Norsk tid, inkl sommertid	UTC
Oppgis definisjon av enheter for parametrene	Delvis (vha. bruk av enhet som attributtnavn)	Ja
XML-skjema tilgjengelig	Nei	Ja
Parameter (enhet i parentes)	Nedbør (mm) Vindretning (grader) Vindstyrke (m/s) Temperatur (°C)	Nedbør (mm) Vindretning (grader) Vindstyrke (m/s) Temperatur (°C) Lufttrykk (hPa) Skydekke (%) Tåke (%) Lave skyer (%) Middels skyer (%) Høye skyer (%)
Metadata om værmodell	Modellens gyldighet	Modellens gyldighet Modellkjøretidspunkt Navn på modell
Temporal oppløsning	6 timers perioder 24 timers perioder mot slutten av perioden.	1 times perioder 1 times tidspunkt
Starttidspunkt	Førstkommende hele 6-timersperiode	Nåværende hele time.
Tekstlig varsel utarbeidet av meteorolog	Ja	Indirekte via annen webtjeneste («Textforecast»)
Valg av sted i forespørsel	Stedsnavn	Lengde-, breddegrad og høyde

Strukturen gjør at dataene fra yr.no er best egnet for enkel implementering av værvarsel i nettsider. Api.met.no gir mer strukturerte data og flere variabler, og passer bedre til videre bearbeiding, som for eksempel til bruk i numeriske modeller. Den økte kompleksiteten i dataene fra api.met.no øker imidlertid kravene til systemene som skal håndtere dataene. Likevel vil bruk av meteorologiske data fra api.met.no i stedet for yr.no være hensiktsmessig i de fleste multikriterieanalyser.

Oppløsningen var et kritisk element i snøstabilitetsmodellen, og i kapittel 4.3 så vi at dataene ble tilrettelagt med en felles oppløsning. De meteorologiske prognosene stammer fra en værmodell med 8 kilometers oppløsning. Selv om resultatene fra HIRLAM publiseres for punkter identifisert ved stedsnavn, aksepterer implementasjonen å hente ut prognoser for et sett av punkter. Rasterdata kan da gjenprodusere i samme oppløsning som værmodellen. Selv om punktdataene hentes for hver 8x8-kilometerscelle, vil forskjellen i oppløsning og terrengmodellen gjøre at den lokale variasjonen av prognosene må beregnes ved hjelp av interpolasjon for å kunne benyttes i analysene. Skaugen (2002) har tidligere vist hvordan «Inverse distance weighted»-interpolasjon kan brukes for å finne lokal variasjon av nedbør fra 11-kilometers datasett. Resultatet fra interpolasjonen var et datasett med 1-kilometers oppløsning, en oppløsning som var høy nok til å kunne brukes i hydrologiske modeller.

Initielle forsøk på å interpolere HIRLAM-prognosene tyder på en romlig korrelasjon for nedbør og temperatur, men flere analyser er nødvendige for å bekrefte dette. Studien av Skaugen (2002) viser at det er mulig å interpolere nedbørsverdiene i en HIRLAM-prognose til et raster med ca 1 kilometers oppløsning med gode resultater. For vindparametrene er, i følge Ryan (1977), beregning av vindretning i fjellterreng spesielt vanskelig, og på grunn av topografiens effekt på vindstrømmene bør trolig ikke interpolasjonsmetoder brukes. Interpolasjon av nedbør og temperatur bør derimot vurderes i seinere bruk av multikriterieanalyser for beregning av snøstabilitet.

Et alternativ til interpolasjon er å bruke meteorologiske data av høyere oppløsning. Dataene fra met.no og api.met.no stammer fra samme værmodell, så et skifte av datagrunnlag til sistnevnte vil ikke gi bedre oppløsning. Det eksisterer imidlertid værmodeller som kan produsere prognoser i en oppløsning som kan være akseptabel for snøstabilitetsmodellen. For eksempel undersøkes en værmodell med 1,4 kilometers oppløsning i Tisler et al. (2007). Studien konkluderer at høyere oppløsning på værmodelleringa gir mer realistiske resultater, selv om modellene bør forbedres for å gi fullt utbytte. I motsetning til multikriterieanalyser, regner værmodellen både med fysiske prosesser i atmosfæren og topografiske effekter. Derfor vil bruk av værmodeller med oppløsning ned mot 1 kilometer gi mer detaljerte resultater for de meteorologiske variablene enn estimering ved hjelp av multikriterieanalyser.

I tillegg til å øke kvaliteten på dataene, kan høyere oppløsning redusere behovet for interpolasjon av de meteorologiske variablene. Prognoser med oppløsning ned mot 1 kilometer kan gi nok detaljer om ikke-høyderelaterte variasjoner i området til at de meteorologiske variablene kun må justeres i forhold til høyde, selv om dette bør undersøkes nøyer. Selv om en oppløsning tilsvarende terrengmodellens oppløsning, det vil si 25 meter, ikke skulle være oppnåelige med dagens værmodeller, bør det likevel undersøkes om værmodeller med høyere oppløsning kan gi tilfredsstillende detaljgrad i multikriterieanalysene.

Selv om bruken av webtjenester for å publisere prognosene gjør tilgangen lettere, publiserer verken yr.no eller met.no prognosene som rasterdata. Siden værmodellen selv produserer rasterdata, blir dataene først konvertert fra det originale rasterformatet til vektordata før publisering på webtjenesten, og deretter konverterer snøstabilitetsmodellen vektordataene tilbake til raster i snøstabilitetsmodellen. Met.no driver også webtjenesten «Gribfiles» via api.met.no som returnerer prognoser som raster på GRIB-format. Dette formatet krever egne rutiner for konvertering til et format som kan brukes i multikriterieanalysene. Ved å benytte andre webtjenester som tilbyr rasterprognoser i et standardformat som håndteres i GIS, vil derimot konverteringa være overflødig. For å unngå feilkilder og redusert ytelse som følge av konvertering, burde snøstabilitetsmodellen derfor hente inn prognoser som rasterdata hvis mulig.

Også for observasjoner kan flere datakilder brukes. For eksempel publiserer met.no data fra sine værstasjoner via webtjenesten «Klimadata web service». Ved å sende en forespørsel med ønsket værstasjon og tidsperiode, returnerer tjenesten observasjonsdata som ei xml-fil. I denne studien var dette ikke aktuelt, da det eksisterte værstasjoner som var nærmere enn met.no sine stasjoner ved Lesja og Stryn. Tjenesten er imidlertid et gunstig alternativ for områder hvor met.no sine værstasjoner er aktuelle kilder for data.

Selv om flere værstasjoner brukes, vil sannsynligvis antallet være begrenset. Selv i områder med stor tetthet av værstasjoner vil observasjonsdata være tilgjengelig for et begrenset antall punkter. I motsetning til meteorologiske prognoser, vil observasjonsdataene være avhengig av modellering for å få god representasjon av variasjonen i de aktuelle områdene.

5.2.3 Introduksjon av nye variabler

Variablene som ble brukt i modellen er plukket ut basert på hva som var tilgjengelig og som var antatt å ha størst betydning for snøstabiliteten (lavest entropi). Det er imidlertid andre parametre som også kan vurderes i snøstabilitetsmodellen.

For bruk i multikriterieanalyser er det flest alternative datakilder for data av typen snø- og værfaktorer i McClungs (2002) kategorisering, siden disse ofte er numeriske variabler. Av de er en av de viktigste som ikke er inkludert i modellen solstråling. Data om solstråling publiseres blant annet i prognosene fra api.met.no og i observasjonene fra Fonnbu. Solstrålinga kan føre til både smelting av snø samtidig som det bidrar til metamorfose i snølagene. Vegetasjon vil også påvirke de meteorologiske faktorene. Tett skog vil for eksempel ha store utslag på akkumulert nedbør, og være lite sannsynlig som utløsningssone for snøskred (Maggioni og Gruber 2003). Begge disse kan være aktuelle datasett som bør vurderes i snøstabilitetsmodellen.

De andre typene faktorer i McClungs kategorier er sjeldnere numeriske, og dermed verre å inkludere. En faktor som kan ha stor betydning for noen områder er kunstig utløsning av snøskred for å øke stabiliteten for en skredbane. Det kreves faglige vurderinger for å inkludere denne i analysene. Skjærstyrken for de aktuelle skredbaner midlertidig justeres opp, men dette kan medføre mange lokale, midlertidige justeringer. Dermed bør det vurderes å holde denne type informasjon utenfor multikriterieanalysene.

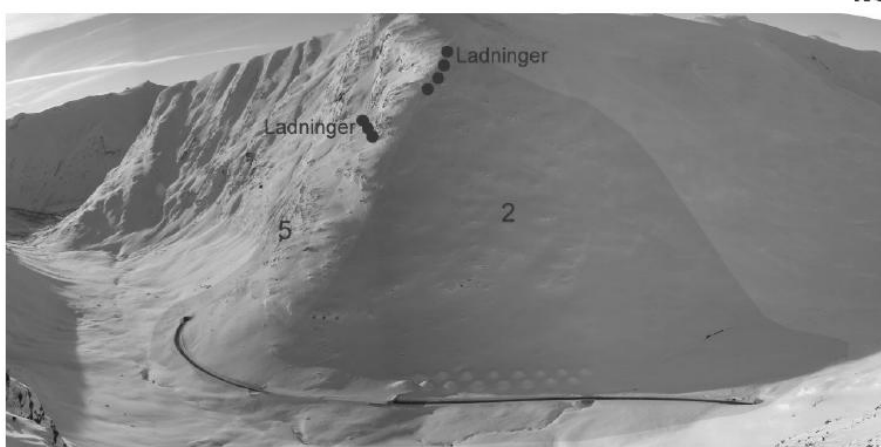
Det finnes også kunnskap som brukes i manuell snøstabilitetsvurdering, men som ikke er uttrykt eksplisitt. Dette er implisitt kunnskap, som ofte innehas av noen få eksperter eller hos lokalbefolkningen. I mangel av historiske register av snøskred, innhentet for eksempel Furdada et al. (1995) kunnskap fra lokalbefolkningen og personell ved skianlegg for å kartlegge skredbaner.

Implisitt kunnskap kan likevel beskrives numerisk i en forenklet tilstand. Et eksempel på dette er kunnskap om hvor utsatt enkelte skredbaner er i forhold til vindretning. Denne kunnskapen kan bakes inn i modellen ved å vekte skredbanene ut fra vindretning. Tilsvarende er kunnskap om sammenhengen mellom lokal nedbørsmengde og prognoser for nedbørsmengde og

vindretning. I motsetning til kunstig utløste skred, vil disse faktorene kunne være permanente lokale justeringer, og bør derfor være mer aktuelle for inkludering i modellen.

Det finnes flere måter å fange implisitt kunnskap. En framgangsmåte er et konsept kalt «Boundary objects», som er satt i en GIS-sammenheng av Puri (2007). Konseptet forenkler kommunikasjon på tvers av forskjellige faggrupper for fange opp lokal kunnskap, og uttrykke det som geografisk informasjon. Slike metoder kan være nyttige i utarbeidelsen av kriterier i multikriterieanalysene og til lokale justeringer av modeller.

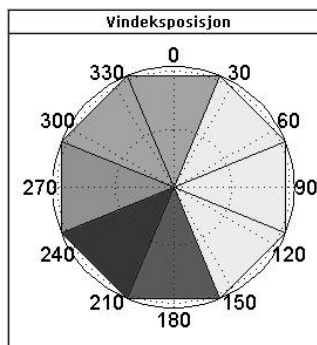
Strynefjellet - Sætreskarsfjellet



Skredbane

Topografi	Verdi	Enhet
Fallhøyde		m
Øvre utløsningshøyde	1400	moh
Nedre utløsningshøyde	1200	moh
Høyde betapunkt	1000	moh
Betavinkel	30	grader
Skredstørrelse	4	indeks
Klimasone	2	

Utsatt objekt	Verdi	Enhet
Objekt	RV15	
Objektvinkel	33	grader
Relativ	110	
Sikring	delvis overbygg	



Figur 5-5 Skjermdump fra NGIs interne skredvarslingssider.

Implisitt og dokumentert fagkunnskap kan også bedre modellene. Kunnskap og vurderinger som benyttes i de manuelle stabilitetsvurderingene kan benyttes til å forbedre multikriterieanalysene. Flere lokale tilpasninger kan utføres ved å bruke kunnskap om skredaktiviteten i området. En kilde for lokalkunnskap ved Strynefjellet er dokumentasjon på NGIs interne sider for skredvarsling (Figur 5-5). For eksempel kan kunnskap om

vindeksposisjon brukes til å vekte nedbørsmengden for skredbanene ved bestemte vindretninger.

I kapittel 2.4 så vi forskjellige variabler som LaChapelle (1980) og McClung (2002) anså som relevante for stabiliteten. Basert på deres konklusjoner, vil vi foreslå at noen prinsipper bør være styrende ved valg av variabler i snøstabilitetsmodellen:

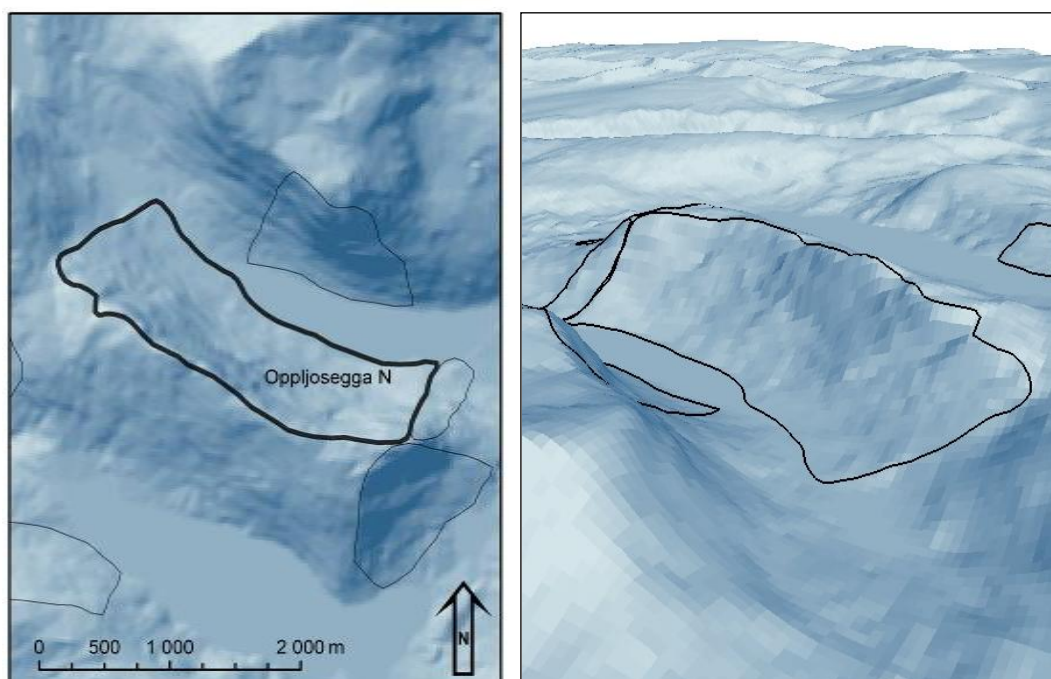
- Parsimoni-prinsippet bør overholdes, det vil si at et minimum av parametre som anses som nødvendig benyttes.
- Dataenes entropi bør vurderes, slik at de faktorene som har størst innvirkning på stabiliteten brukes.
- Dataene må kunne håndteres av multikriterieanalysene; normalt betyr dette at variablene bør kunne representeres som numeriske verdier, enten direkte eller via reklassifisering.

Dette bør sikre at snøstabilitetsmodellen produserer resultater av høyest mulig kvalitet.

5.2.4 Forbedringer av skredbanedataene

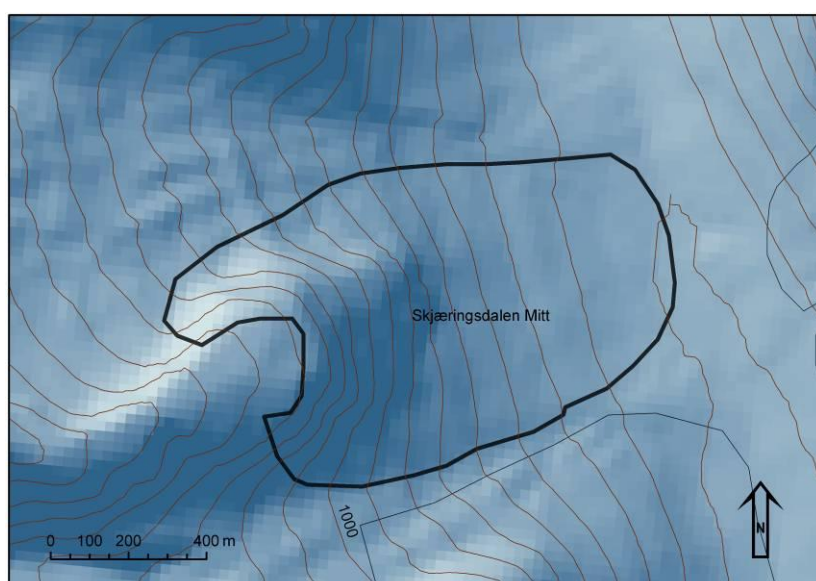
Skredbanedatasettet er viktig for å identifisere skredbaner med lav stabilitet, og vil også være viktig for konsekvensutredningen i et tidligvarslingssystem. Vi har tidligere sett at tilsvarende datasett for skredbaner har blitt brukt i studier av Furdada et al. (1995), hvor dataene blir brukt til videre analyser, risikokart og mottiltak. Denne studien viser derimot at skredbanedatasettet for Strynefjell er utilstrekkelig for bruk i multikriterieanalyser.

En av de største svakhetene er skredbanenes dekningsområder. Figur 5-6 viser skredbanen «Oppljosegga Nord» i den nordøstlige delen av studieområdet. Banen er 2,8 kilometer i planretning og er avbøyd. Den store bredden gjør at det innenfor skredbanen kan være store variasjoner av snøstabilitet. Samtidig kan konsekvensvurderinga for et snøskred være vanskelig, da utløpsområdene omfatter et relativt stort område. Samme problem oppstår for andre skredbaner som «Storfonn» og «Skjæringsdalen S». Denne svakheten kan rettes på ved å dele skredbanen inn i flere mindre skredbaner.



Figur 5-6 Kart og 3D-kart av skredbanen Oppljosegga Nord. 3D-kartet er som sett fra nordvest.

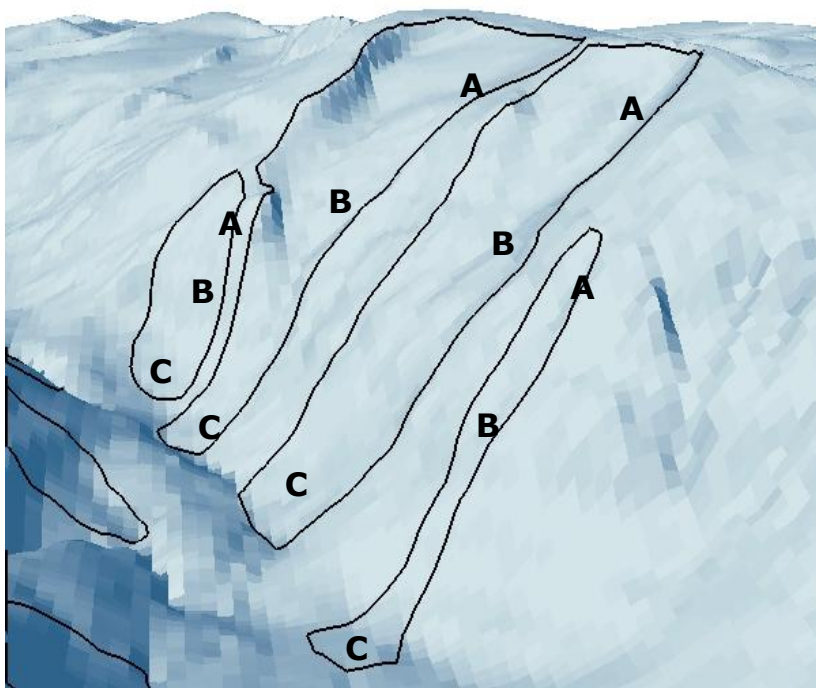
Samtidig gjør den avbøyde formen at «Oppljosegga Nord» får redusert snøstabilitet ved flere vindretninger. Dette ser vi også ved andre baner. «Skjæringsdalen Mitt» er en skredbane som har divergerende overflate (Figur 5-7). Denne blir utsatt i forhold til alle vindretningene unntatt sørvestlige vindretninger. En sørlig vind kan for eksempel gi ustabilitet i den nordlige delen av banen, og selv om den sørlige delen av banen fortsatt vil ha god stabilitet, vil hele skredbanen blir vurdert som ustabil. Også denne svakheten vil kunne unngås ved en inndeling i mindre baner.



Figur 5-7 3D-kart av «Skjæringsdalen Mitt». Høydekoter med 50 m ekvidistanse er lagt over.

Selv om disse effektene ikke vil påvirke snøstabiliteten for enkeltceller, gir de redusert presisjon i identifiseringa av skredbaner med lav stabilitet. Skredbanene kan dermed med fordel deles inn i mindre skredbaner ved at hver skredbane kun har ett skredløp som rammes av skred utløst i en utløsningssone. Skredløpet kan gjerne overlappe andre skredbaner.

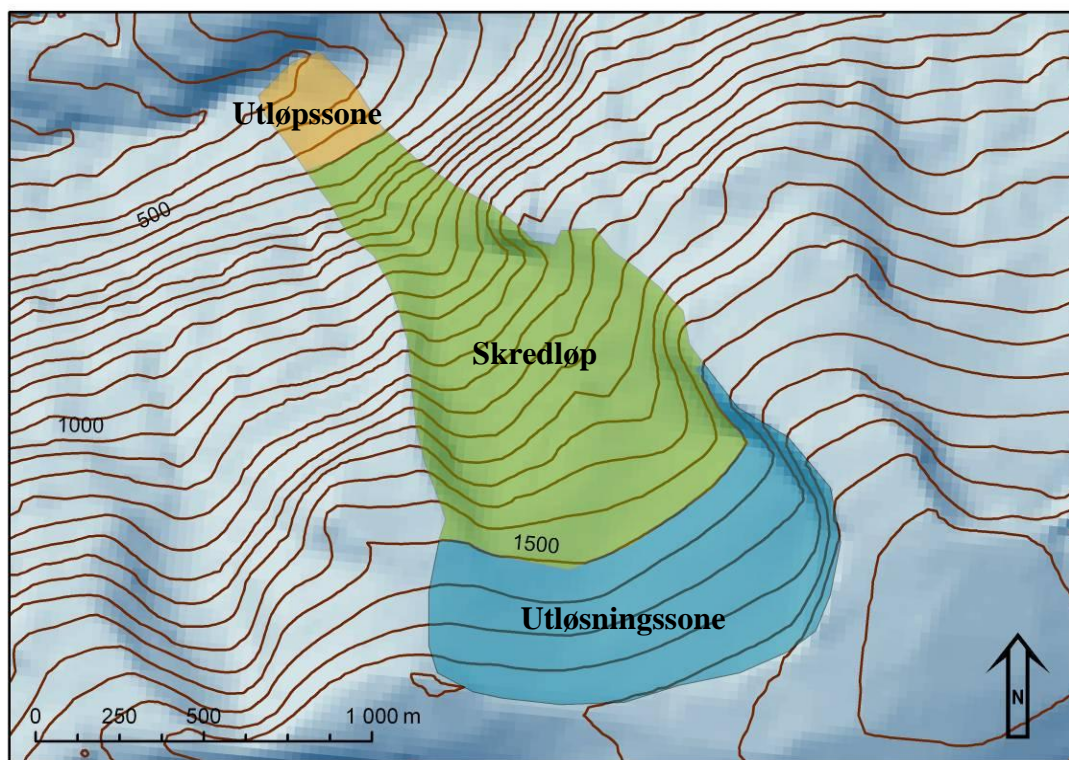
Skredbanenes manglende inndeling i skredsoner er en annen svakhet ved datasettet. I en snøstabilitetsmodell er det først og fremst snøstabiliteten i utløsningssonen som er kritisk. De to andre sonene blir først og fremst brukt for vurderinga av konsekvenser ved eventuelle skred. Figur 5-8 viser fire skredbaner for studieområdet. På kartet indikeres en omtrentlig plassering for de forskjellige sonene.



Figur 5-8 3D-kart av de sørlige skredbanene sett fra nordvest. Skredbanenes soner indikert. A=Utløsningssone, B=Skredløp, C=Utløpsområde.

Skredbanenes egenskaper kan brukes for en automatisk inndeling i soner. Den enkleste metoden er å dele inn i høydesoner. Skredbanen «Godtidfonn» (Figur 5-9) ligger mellom 350 moh. og 1750 moh., og terskelverdier er satt til 500 mellom utløpssone og skredløp, og til 1500 mellom skredløp og utløsningssone. Sonene er laget ved å reklassifisere terrengmodellen, konvertere det omklassifiserte rasteret til vektor med forenkling av polygoner, og til slutt klippe dette ved å bruke skredbanepolygonet som klippepolygon. I

eksempelet passer utløsningssonen som forventet for de øvre delene, men bratte deler på begge sider av skredløpet tas ikke med. Helningen her er trolig stor nok til at skred kan utløses. En mulighet er å øke størrelsen på utløsningssonen. Trolig bør utløsningssonen defineres til 950 moh. for å sikre at alle potensielle utløsningssoner inkluderes hvis denne metoden skal brukes.



Figur 5-9 Skredbanen «Goddidfonn» inndelt i soner i henhold til høyde: 350-500 moh, 500-1500 moh. og over 1500 moh. Ekvidistanse: 50 m.

En annen metode for inndeling i soner er å bruke terrengparametre, for eksempel kurvatur. Høydeprofilene for de fire skredbanene har derimot vesentlige forskjeller (Vedlegg G). Dette vanskeliggjør bruk av kurvatur for å bestemme skredbanenes soner, og automatisk inndeling i soner basert på høyde eller kurvatur vil trolig ikke gi tilfredsstillende resultater.

Skredbanene bør dermed produseres på forhånd med begrenset omriss og delt inn soner.

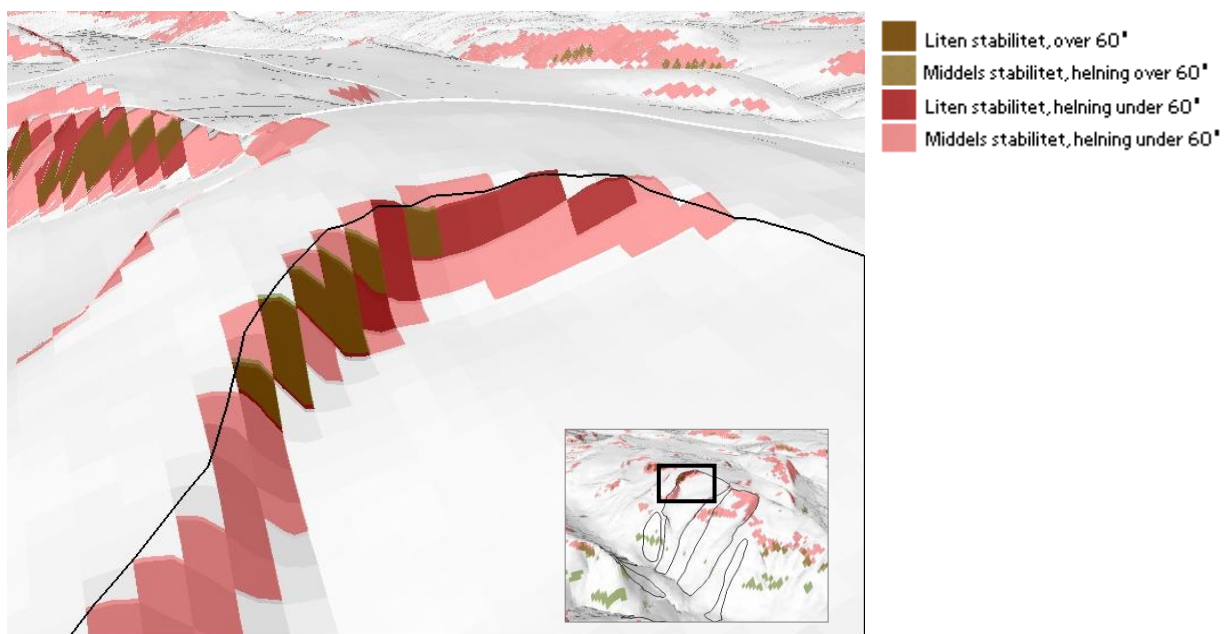
Følgende kriterier for valg av skredbanene foreslås brukt:

- En skredbane har kun en utløsningssone.
- En skredbane har kun ett skredløp.
- Skredbaner kan overlappe.
- Skredbanene deles inn i soner: Utløsningssone, skredløp og utløpssone.

5.2.5 Ekskludering av bratte helninger

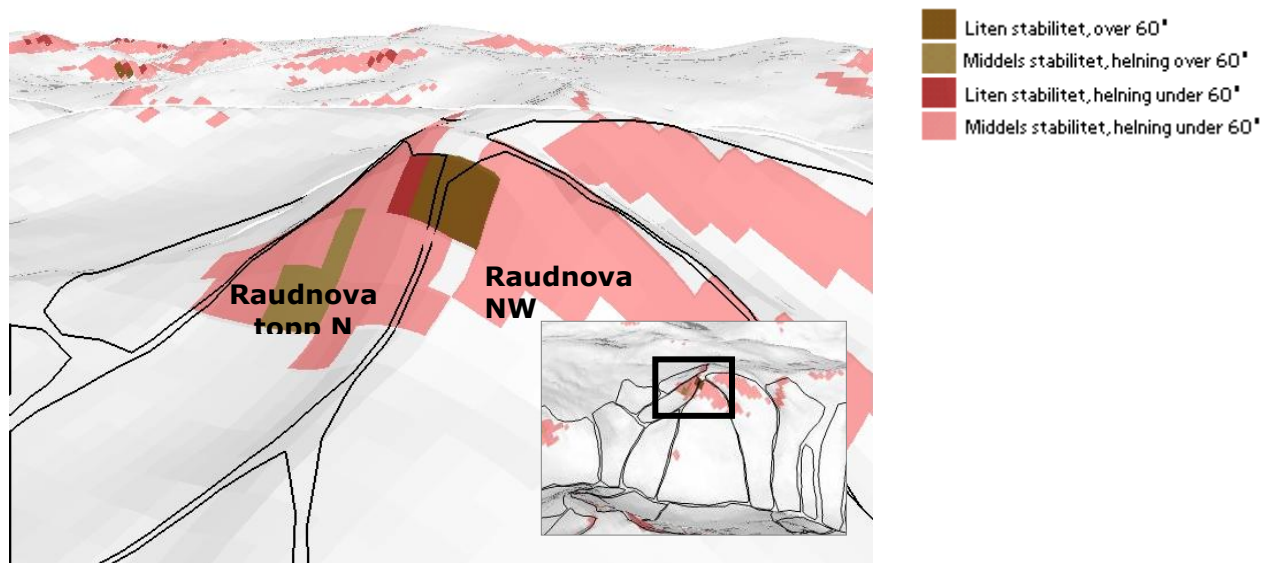
Selv ved en bedring av skredbanedatasettet, vil skredbanene inkludere områder som er for bratte til å utgjøre trussel. Snøskred oppstår sjelden i helninger over 60°, jf. kapittel 2.4. Det bør derfor vurderes å ekskludere celler med helning over 60° fra modellen.

I snøstabilitetsmodellen framstår «Godtidfonn» som et av minst stabile områdene. I øverste del av denne skredbanen viser terrengmodellen en helning på opp mot 65°. Figur 5-10 viser et eksempel på snøstabiliteten for en dag med lav stabilitet i «Godtidfonn». Alle celler med helning over 60° hadde i dette tilfellet lav snøstabilitet. I tillegg fantes også lav stabilitet i celler med mindre helning. Den minste helningen for ei celle med lav snøstabilitet i dette tilfellet er kun 48°. I dette tilfellet ville fjerning av store helninger ikke hatt betydning for skredbanens stabilitet.



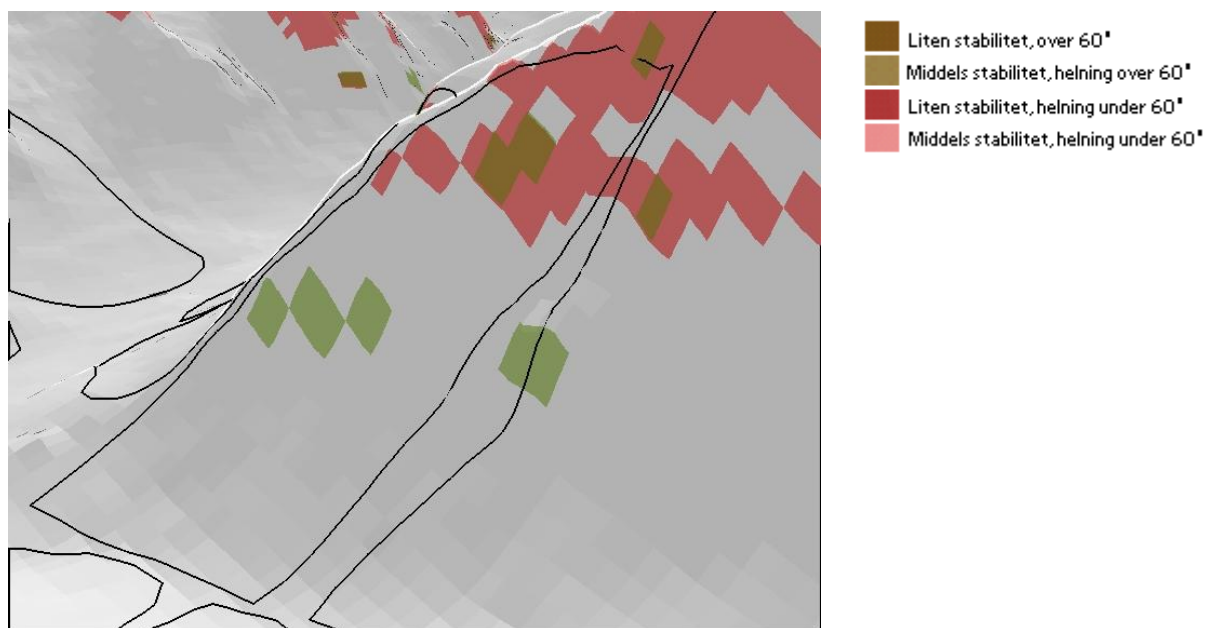
Figur 5-10 3D-kart av øvre del av «Godtidfonn» sett fra nordvest. Snøstabilitet 23.02.2008 som varslet 17.02.2008 kl 03:00.

Figur 5-11 viser et eksempel der celler brattere enn 60° påvirker banens stabilitet. Figuren viser to skredbaner på Raudnovas nordside. Begge banene er beregnet til å ha lav snøstabilitet for den valgte dagen. Lav stabilitet er derimot begrenset til et område rundt nordspissen av Raudnova der helningen er brattere enn 60°. Ved å utelukke disse fra stabilitetsberegninga ville forholdene for skredbanene blitt justert til middels stabilitet.



Figur 5-11: 3-D-kart av skredbanene ved Raudnova sett fra nord. Snøstabilitet 23.02.2008, varslet 17.02.2008 kl 03:00.

Helning over 60° kan selvsagt også forekomme nedenfor typiske utløsningssoner. Figur 5-12 viser et eksempel der flere av cellene i midtre delene av skredbanen «Storurfonn» hadde helning på over 60°. Selv med høy helning bidro ikke disse cellene til lav snøstabilitet, trolig på grunn av at nedbøren er mindre i disse lavereliggende cellene.



Figur 5-12: 3-D-kart av «Storurfonn» sett fra sørøst. Snøstabilitet 23.02.2008, varslet 17.02.2008 kl 03:00.

Det bør derfor vurderes å ekskludere områder som er for bratte til at snø kan akkumuleres. Dette kan gjøres ved å gi celler brattere enn en gitt helning nullverdi. Eksklusjonen vil medføre at snøstabiliteten anses som god for celler med stor helning. I og med at bratte fjellsider hvor snø faktisk har samlet seg, og dermed gir dårlig stabilitet, kan bli satt til god stabilitet, bør dette utføres med forsiktighet. Eventuelle terskelverdier bør uansett ha god sikkerhetsmargin. Et alternativ til eksklusjon er derfor å markere bratte celler som har middels eller lav stabilitet, slik at fageksperter kan ta en manuell vurdering.

5.3 Vurdering av delmodeller

Vi har diskutert selve snøstabilitetsmodellen og datagrunnlaget som brukes. I dette kapitlet skal vi vurdere delmodellene som bygger opp snøstabilitetsmodellen, og se på forslag til forbedringer av disse. Vi skal se på to av delmodellene: snødriftsmodellen og modellen for ekstrahering av snøstabilitet til skredbanene.

5.3.1 Snødriftsmodell

Snødrift fører til akkumulering og erosjon av snø i visse områder, og kan ha stor betydning for snøstabiliteten. Snødriftsmodellen er derfor en av de viktigste delmodellene. Modellen er basert på en modell som ble implementert for andre formål enn dette prosjektet. For å benyttes i snøstabilitetsmodellen ble det dermed gjort visse tilpasninger og forenklinger. Resultatene viser at disse endringene ikke nødvendigvis er optimale.

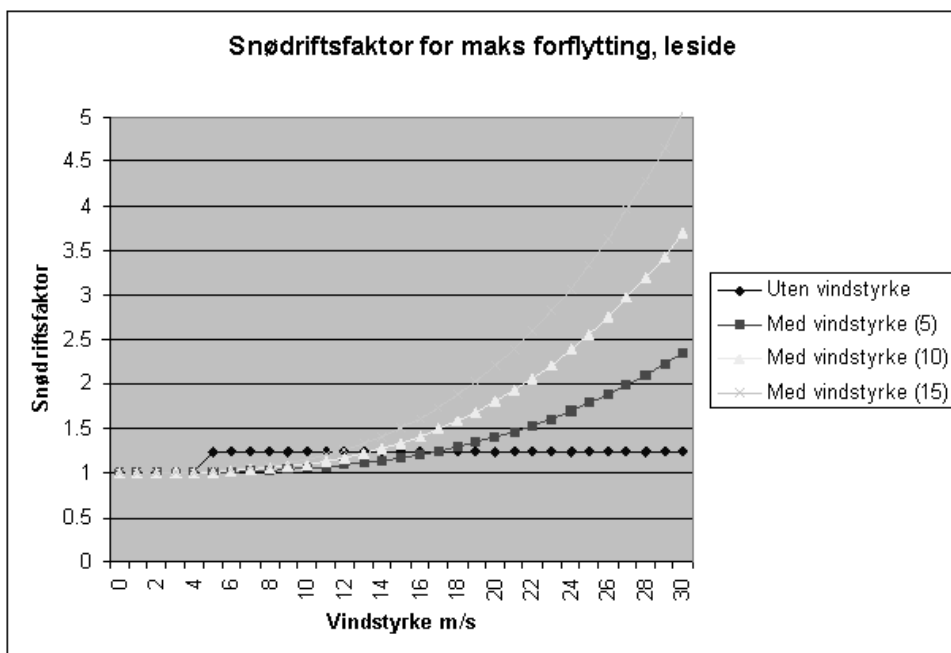
Den originale modellen hadde som formål å beregne snødrift over en hel vintersesong. Siden skredaktiviteten i studieområdet er sterkt knyttet til snøstorm, er kun snødriften over korte perioder interessant. Dette løses i studien ved å beregne snødrift for de siste 6 timene med nedbør. Nedbørsmengdene innenfor en så kort periode er normalt små, dermed får snødriften liten effekt på snøstabiliteksindeksen. Snødrift påvirker også eldre snølag, og fører trolig til kraftigere erosjon og akkumulering enn det som resultatene fra studieperioden indikerer. Snødriftsmodellen bør derfor justeres til å også inkludere snøfall eldre enn 6 timer.

Effekten av snødrift svekkes ytterligere ved at vindhastigheten som brukes fra Fonnbu er i gjennomsnitt vesentlig lavere enn antatt vindhastigheten ved utløsningssonene. For de fleste tidsrommene i studieperioden ble ikke snødriften modellert på grunn av for lav vindhastighet. Applikasjonen tillater simulering ved å anvende en multiplikasjonsfaktor for vindhastigheten,

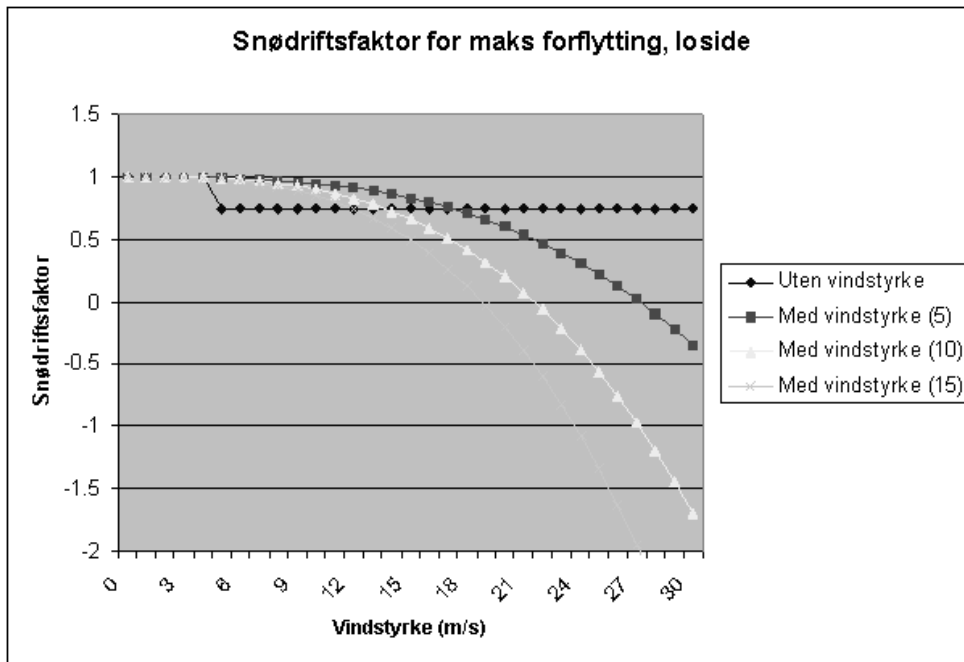
og denne kan brukes for å framprovosere modellering av snødrift oftere. Dette vil likevel ikke nødvendigvis gi en god representasjon av vindhastigheten ved utløsningssonene. Basert på sammenlikningen av værstasjoner i kapittel 4.4.1 vil trolig et bedre alternativ være å bruke observasjonene fra Kvitenova.

På grunn av at hele sesongen var interessant i den originale snødriftsmodellen, inkluderte den ikke vindhastighet. Det er imidlertid antatt at snødriften er eksponensielt avhengig av vindhastigheten (Jaedicke 2001), og dermed kan føre til en vesentlig variasjon i snødekket over tid. Derfor ble snødriftsmodellen endret slik at snødriften økte eksponensielt med vindhastigheten. I tillegg ble to parametre innført for å justere graden av snødrift; vindstyrkefaktor og vindstyrkepotens, jf. kapittel 4.3.4.

Resultatet er at effekten av snødrift er mindre enn den originale modellen ved lave vindhastigheter (Figur 5-13), og større for høye vindhastigheter (Figur 5-14). For en vindstyrkefaktor på 5 betød endringen at vindhastigheten måtte være over 17 m/s for at snødriften ble like stor som for den originale snødriftsmodellen.



Figur 5-13 Maksimum forflytning fra loside ved snødrift med og uten vindstyrke. Vindstyrkefaktoren i parentes.



Figur 5-14 Maksimum forflytning fra loside ved snødrift med og uten vindstyrke. Vindstyrkefaktoren i parentes.

Snødriftseffekten skal ikke føre til endring i totale nedbørsmengden, med unntak av eventuell fordamping. Snødriftsmodellen beregner imidlertid ikke forflytningen forårsaket av snødrift direkte, men estimerer snødrift for hver celle separat basert på meteorologiske verdier og terrengparametre. Modellen garanterer dermed ikke at nedbørsmengden for området holdes konstant.

Analyse av den totale snømengden før og etter modellkjøring ved hjelp av «Band collection statistics»-verktøyet i ArcGIS bekrefter dette (Tabell 12). Nedbøren modellert i henhold til høyde gir en høyere gjennomsnittsverdi enn nedbørsmengden varslet for Grasdalen på grunn av at gjennomsnittshøyden for studieområdet, 1108 moh., er høyere enn Grasdalen. Snødriftsmodellen øker den gjennomsnittlige snømengden for området ytterligere.

Ved å gjøre nedbøren eksponensielt avhengig av vindhastigheten er økningen lav ved liten vindstyrke. Først ved høyere vindhastigheter blir feilen vesentlig: 17 m/s vindhastighet blir for eksempel gjennomsnittet 3,5 % høyere. Dette er høyere enn største vindhastighet ved Fonnbu i studieperioden, men Kvitenova opplevde hastigheter over 20 m/s.

Tabell 12 Statistikk for snødriftsmodellen for gitte parametre. F = vindstyrkefaktor, P = vindstyrkepotens.

Datasett	Gjennomsnittlig snømengde (mm)	Relativt i forhold til *	Standard-avvik	Maksimums-verdi	Minimums-verdi
Konstant nedbør (input)	6,1	-23,8 %	0	6,1	6,1
Nedbør kun avhengig av høyde *	8,01	0 %	2,33	14,21	3,42
Snødriftsmodell uten vindstyrke	8,45	+5,5 %	2,08	16,44	2,86
Snødriftsmodell med vindstyrke. F=5, P=3	8,11	+1,0 %	2,27	14,45	3,40
Snødriftsmodell. Vindstyrke = 8,6 m/s. F=15 P=3	8,17	+2,0 %	2,29	15,25	3,40
Snødriftsmodell med vindstyrke 17,2 m/s. F=5, P=3*	8,28	+3,4 %	2,35	17,45	3,26
Snødriftsmodell med simulert vindstyrke på 34,4 m/s. F=5, P=3	9,64	+20,3 %	4,97	42,19	2,06

Snødriftsmodellen fører dermed til for høye estimater av den totale nedbørsverdien, derav reduksjon i snøstabiliteten. Feilen er likevel relativ liten, og vil trolig ha liten betydning i forhold til andre usikkerhetsfaktorer. Justering av resultatene for disse feilene bør derfor ikke være nødvendige.

Tross svakhetene tyder resultatene på at en snødriftsmodell med fordel kan brukes for beregning av snøstabilitetsindeksen. En god snødriftsmodell vil være vesentlig for identifisering av ustabile skredbaner, men må også veies opp mot analysetid og kompleksitet.

5.3.2 Ekstrahering av snøstabilitet til skredbaner

Snøstabilitetsmodellen beregner også snøstabiliteten per skredbane. Etter at prognoser for snøstabilitetsindeks er produsert, får skredbaner tildelt en stabilitetsindeks ut fra den cella innenfor skredbanen som har minst stabilitet. Ekstraheringa fører til at farlige skredbaner er enkle å identifisere for beslutningstakere. Siden stabilitetsindeksen lagres som en

attributtverdi i vektordataene, er det mulig å bruke resultatene i seinere analyser. I denne studien har vi brukt denne muligheten til å summere antall skredbaner med høy og middels stabilitet, og sammenlikne det med varsler fra NGI. Ekstraheringa kan derfor vise seg å være et effektivt verktøy for både å presentere resultatene og i videre analysere.

Det må likevel tas noen forbehold ved skredbanenes stabilitetsindeks. Vi har tidligere sett at skredbanene ikke er tilpasset snøstabilitetsmodellens formål (kapittel 5.2.4). Dermed blir resultatet av ekstraheringa vanskelig å tolke, både med tanke på identifisering av utsatte baner og på eventuelle konsekvensutredninger og gjennomføring av mottiltak. Et forbedret skredbanedatasett sammen med bedre meteorologiske modeller bør gi muligheter for mer presis klassifisering av skredbanenes stabilitet.

Et annet forbehold gjelder hensynet til den romlige oppløsningen. Snøstabilitetsverdien er avhengig av oppløsningen til terrengmodellen; mindre cellestørrelser fører til at enkelte celler får brattere helning, og dermed lavere stabilitet. Tolkning av snøstabilitetsverdien avhenger dermed av terrengmodellens oppløsning. Vurdering av terrengmodellens oppløsning bør inngå i definisjonen av snøstabilitetsindeksen for det valgte området.

Et alternativ til å hente ut minimumsverdien, er å hente ut gjennomsnittsverdien for stabiliteten innenfor skredbanens utløsningssone. Det er i så fall viktig med klar definisjon av utløsningssonene, slik som ble foreslått i kapittel 5.2.4. Terskelverdiene for middels og lav stabilitet bør vurderes for hver enkel skredbane, da skredbanenes utløsningssone kan ha varierende størrelse og gjennomsnittshelning. Hvis en terrengmodell med passende oppløsning brukes, bør heller metodene brukt i denne studien brukes. Det er den enkleste metoden, og den medfører ikke reduksjon i objektivitet ved å definere forskjellige terskelverdier per skredbane.

5.4 Videreutvikling av multikriterieanalyser i varslingssystemer

Vi har diskutert hvordan multikriterieanalysene implementert i studien kan brukes i beregning av snøstabilitetsindeksen, og hvordan dette kan bidra til varsling av snøskredfare. I et varslingssystem betraktes flere faktorer enn de som inngår i multikriterieanalysene. Multikriterieanalysene kan dermed ikke benyttes som et frittstående varslingssystem for

snøskred. Videre utvikling innen multikriterieanalysene og teknologien som støtter disse bør kunne øke nytten av multikriterieanalyser.

Følgende faktorer vil trolig være vesentlige for utviklingen av multikriterieanalyser:

- Utvikling av GIS med mer funksjonalitet innen multikriterieanalyser.
- Økt interoperabilitet.
- Bedre værmodeller med høyere oppløsning.

Flere faktorer tyder på at utviklinga forenkler bruken av GIS i multikriterieanalyser. Spesielt skaper innføringa av modellverktøy som ArcGIS ModelBuilder nye muligheter. Modellene kan bygges med tilhørende logikk, og med fleksibilitet gjør at parametre kan styres. Samtidig gjør grensesnitt for programmerere det enklere å utvikle verktøy for romlige multikriterieproblemer. Sammen med økt interoperabilitet og bedre værmodeller, som vi skal se nærmere på i de neste kapitlene, kan de føre til at multikriterieanalyser kan gjøre beslutningstakere bedre i stand til å ta avgjørelser basert på romlige kriterier.

Integreringa av GIS og multikriterieanalyser kan også ses på som et steg på veien mot et romlig beslutningsstøttesystem, forkortet SDSS (engelsk «Spatial Decision Support System»). SDSS vil være et helhetlig system som i følge Chakar et al. (2003) vil ta seg av hele prosessen – fra dataertering og lagring via romlige analyser til visning av løsningsalternativene. I en seinere artikkel (Chakhar og Mousseau 2007) foreslås det at SDSS blant annet inkluderer webserver, applikasjonsserver og databaseserver. Uansett om denne formen for SDSS er realistisk eller ønskelig, så tyder utviklinga på at støtten for romlige analyser i beslutningsstøtteprosesser vil øke.

Resultatene fra denne studien viser at multikriterieanalyser kan gi realistiske resultater som kan benyttes i et varslingssystem. Hvis framtidige studier kan bekrefte dette og samtidig påvise pålitelige resultater ved bruk av en bedre modell, bør det være aktuelt å inkludere multikriterieanalyser i varslingssystemer. Ved operativ bruk kan snøstabilitetsmodellen inngå i vurdering av nåtilstand og analyse av prognoser.

Studien viser også at multikriterieanalysene kan automatiseres og kjøres regelmessig. Dette tillater produksjon av flere prognoser daglig, og dekning av større områder om gangen. I

tillegg til områder som allerede i dag inngår i varslinga, kan analysene utføres for å overvåke nye områder. Ved lav stabilitet kan disse områdene undersøkes nøyere.

Så selv om multikriterieanalyse ikke alene kan brukes til å gi pålitelige skredvarsler, kan metoden bli en viktig del av varslingsprosessen ved å automatisk gi ny og detaljert informasjon om snøstabilitetens variasjon i et område. Videre studier bør derfor følge nøye med på utviklinga innen GIS og beslutningsstøttesystemer, og om mulighetene som oppstår kan føre til økt utnyttelse av GIS og tettere integrasjon med beslutningsprosessen.

5.4.1 Utvikling innen datakilder

Foruten framtidig utvikling av selve konseptene og teknologien som støtter multikriterieanalyser, kan bedre datasett øke nytteverdien av disse i forbindelse med snøskredvarsling.

Størst forbedring vil vi trolig se for de meteorologiske dataene. Utviklinga av nye informasjonskilder var utgangspunktet som gjorde det mulig å utnytte meteorologiske data på Internett i multikriterieanalysene. I studien har vi påpekt flere av utfordringene som er knyttet til bruk av de meteorologiske observasjonene i multikriterieanalysene. Utvikling av nye informasjonskilder kan løse disse utfordringene ved å forbedre datagrunnlaget.

Når det gjelder observasjoner, er Strynefjellet relativt godt dekket av værstasjoner. Likevel kan ikke alle dataene brukes i modellen på grunn av manglende eller dårlig tilgjengelighet. Stasjonene bruker forskjellige sensorer og rutiner for nedlasting og publisering av dataene, noe som gjør utveksling av data vanskelig. Mens egne spesialkomponerte metoder i applikasjonen sørger for å hente data fra Fonnbu, kan ikke data fra Kvitenova lastes ned på en hensiktsmessig måte.

På kort sikt kan avtaler med stasjonseierne som Statens Vegvesen gi tilgang til data. På lengre sikt kan standardisering forenkle utvekslinga av data fra værstasjoner og andre sensorer. Standarder for sensordata utvikles blant annet av OGC, og disse kan spille ei viktig rolle i for framtidig sensorteknologi. Organisasjonen har etablert ei egen arbeidsgruppe som utarbeider standarder for å kode av og aksessere sensordata. Blant flere interessante resultater fra arbeidsgruppa er modeller for koding av observasjoner og spesifikasjon av tjenester for utveksling av

sensordata (McCarthy et al. 2008). Lykkes standardiseringsarbeidet, vil observasjonene fra sensorer bli enklere tilgjengelige og dermed øke antallet datakilder som kan brukes for observasjoner.

I tillegg til data direkte fra sensorer, blir også en økende mengde indirekte og bearbejdede observasjonsdata tilgjengelig via Internett. Eksempelvis publiseres siste dags og siste ukes snøfall på nettstedet seNorge.no (Figur 5-15). Nettstedet bruker blant annet nedbørs- og temperaturobservasjoner fra met.no sitt nettverk av værstasjoner. Dataene blir interpolert og høydejustert, og sluttresultatet er data med oppløsning på 1 kilometer. På nettstedet publiseres dataene foreløpig kun som ferdige symboliserte kartbilder, og er dermed uaktuelle som inndata i multikriterieanalyser. Hvis tjenesten oppjusteres til å publisere resultatene som rasterdata med reelle verdier, kan tjenesten være en potensiell datakilde i en multikriterieanalyse.



Figur 5-15 Nettstedet seNorge.no med nysnømengde.

Utvikling har også skjedd innen meteorologiske prognoser. De siste 50 årene værvarslene blitt sterkt forbedret etter introduksjonen av numeriske værmodeller. Kalnay et al. (1998) forutser at denne utviklinga vil fortsette som en konsekvens av mer prosessorkraft, forbedringer innen observasjonssystemer og fremskritt i numeriske modeller. Sannsynligvis vil dette føre til forbedring av økt romlig oppløsning og mer pålitelige varsler, noe som vil øke kvaliteten på

snøstabilitetsprognosene. Ny teknologi, som for eksempel radarteologi og satellittsystemer, gir også muligheter for nye numeriske meteorologiske data, som blant annet vist i studie av Hamilton (1997).

Utviklinga av teknologi kan dermed gi tilgang til nye og bedre datakilder. Seinere studier innen multikriterieanalyser bør derfor være i stand til å utnytte disse kildene på en hensiktsmessig måte, slik som denne studien har gjort med meteorologiske data på Internett.

5.4.2 Interoperabilitet

Utviklinga av datakilder krever samtidig økt interoperabilitet for å gi full effekt. Studien viser at overføringsformater hindrer en effektiv utveksling av data, en forutsetning Kokkonen et al. (2003) satte for å ta pålitelige beslutninger. Bruken av XML later til å være stadig økende for utveksling av data, først og fremst på grunn av veldefinert struktur og enkel implementering. XML-format viste seg derfor som et godt alternativ for utveksling av meteorologiske data til ikke-meteorologiske fagapplikasjoner. Det er også mulig å utveksle meteorologiske data til applikasjonene ved overføring av fil i vanlige rasterformater, men metoden blir fort ressurskrevende ved utveksling mellom flere parter.

Interoperabiliteten innen GIS er økende, blant annet ved at datautveksling i økende grad skjer ved hjelp av webtjenester på Internett. Det har skjedd en stor utvikling i webtjenester for romlig informasjon de siste årene, spesielt gjennom OGC og International Organization for Standardization (ISO) – en annen internasjonal standardiseringsorganisasjon. Den mest populære standarden for tida virker å være WMS, som er en OGC -standard for utveksling av kartbilder på rasterformat. Denne beskriver imidlertid utveksling av ferdig symboliserte kartfiler, og egner seg ikke for utveksling av meteorologiske variabler i rasterformat.

En alternativ standard er Web Feature Service (WFS), også fra OGC, som spesifiserer webtjenester for utveksling av romlige vektordata. Denne returnerer data på GML, et XML-basert format for romlig informasjon (se kapittel 2.2). Kombinasjonen WFS og GML kan være et alternativ til XML for dataene fra yr.no og api.met.no, da det er tilpasset bruk i GIS-modeller. Dette vil trolig gi noe økt effekt i forhold til XML-dataene som api.met.no og yr.no distribuerer.

En tredje standard kan i større grad bidra til datautvekslinga, OGC-standarden Web coverage service (WCS). WCS spesifiserer webtjenester for utveksling av rasterdata i sin originale form. I motsetning til WMS gir en WCS-tjeneste data og databeskrivelser, og ikke bare ferdigsymboliserte rasterbilder. Siden resultatene fra værmodeller normalt er strukturert som raster, kan dataene beholde sin originale verdi og mest mulig av sin originale struktur. Standarden er foreløpig lite brukt, men det finnes eksempler på bruk innen meteorologi. Det amerikanske forskningsinstituttet National Center of Atmospheric Research har for eksempel innført en tjeneste som publiserer flere tredimensjonale værprodukter ved bruk av WCS (Lab annual report 2007).

Interoperabilitet kan også skje gjennom mer enn bare formater og webtjenester. Allerede i 1998 fastslo Bishr (1998) at interoperabilitet innen GIS kan oppnås på seks nivåer. Utviklinga i GIS-industrien, både hos standardiseringsorganisasjoner, dataprodusenter og programvareutviklere, går mot større interoperabilitet på alle nivåene. Økte interoperabilitet bør legge til rette for økt bruk av multikriterieanalyser. Det bør derfor være av interesse for framtidige studier å se på hvordan interoperabiliteten kan utnyttes i multikriterieanalyser, både for snøskredvarsling og for varsling av andre naturfarer.

5.4.3 Publisering av resultater

Prognosene fra snøstabilitetsmodellen publiseres ved å utnytte nye Internett-standarder. På tilsvarende måte som yr.no publiserer prognoser, kan data fra snøstabilitetsmodellen gjøres tilgjengelig for andre modeller og systemer. For snøstabilitetsmodellen kan resultatene publiseres ved hjelp flere typer tjenester, og både WMS, WFS og WCS kan være aktuelle.

En WMS-tjeneste tillater at snøstabilitetskartene publiseres som ferdigsymboliserte kartbilder. Snøstabilitetskartene kan dermed vises i GIS og webbaserte kartløsninger med standard kartografi. Nyere versjoner av standarden støtter også temporale spørringer mot tjenesten ved å oppgi ønsket tidspunkt. Det blir da mulig å hentet ut prognose for ønskede datoer. Verdiene av snøstabilitetsindeksen kan gjøres tilgjengelig ved å bruke WCS-tjeneste. I motsetning til WMS kan resultatene fra denne tjenesten brukes i andre multikriterieanalyser.

Skredbanene og deres stabilitet kan også publiseres som vektordata gjennom en WFS-tjeneste. Stabiliteten for hver av de 10 dagene framover kan legges som egne søkbare attributter i datasettets attributtabell sammen med annen relevant informasjon. Resultatene

kan også publiseres som nyhetsvarsler ved bruk av RSS. Ved å abonnere på nyhetstjenesten, kan fageksperter få varsel om lav snøstabilitet via deres lokale intranettsider eller direkte i e-posten.

Publiseringa av snøstabilitetsindeksen må alltid vurderes opp mot etiske dilemma og sensitiviteten til dataene, slik vi diskuterte i 5.1.2. Snøstabilitetskartene vil trolig kun være aktuelle for publisering via interne webtjenester for å unngå at uvedkommende får tilgang. Til tross for dette har vi sett at multikriterieanalyser som gir resultater i form av kart, rasterdata og andre romlige produkter kan bedre kommunikasjonen av resultatene. Videre forskning innenfor publisering over Internett vil derfor kunne bidra til mer hensiktsmessig publisering både av resultater fra multikriterieanalysene og av informasjon fra varslingssystemer.

5.4.4 Relevans for varsling av andre naturfarer

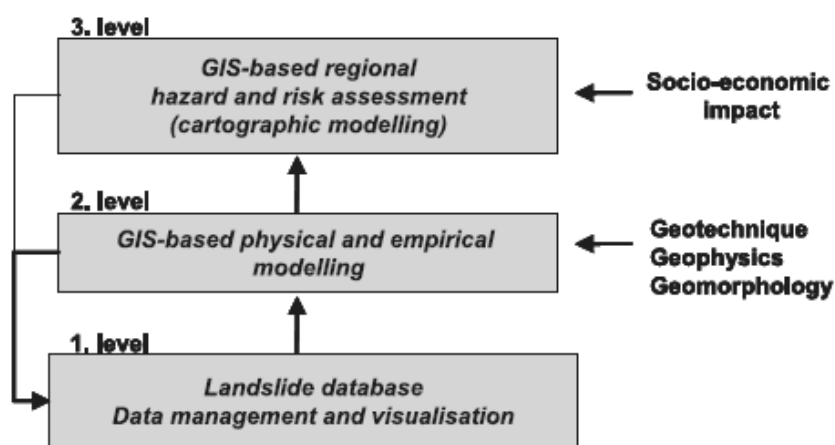
Erfaringene i bruk av multikriterieanalyser for beregning av snøstabilitetsindeksen kan også være interessante for varsling av andre naturfarer. Særlig kan utnyttelsen av datakilder fra Internett i automatiske multikriterieanalyser gi ny informasjon i beslutningsprosessen. Økende mengder av og kilder for observasjoner og prognoser blir gjort tilgjengelige på Internett, og gir både tilgang til nye parametre og redundante datakilder til eksisterende parametre. Dataflyten for Internett-data og den påfølgende bearbeidinga krever en del oppmerksomhet, og denne studien bidrar sammen med tidligere studier til løsninger og eventuelle hindre. Erfaringene ved implementasjon av modellen viser at datakildenes varierende egenskaper og kvalitet krever spesielle håndteringsrutiner, og for snøstabilitetsmodellen var en felles datastruktur et kriterium for suksess.

Bruk av meteorologiske prognoser i multikriterieanalysene ga også positive effekter som kan utnyttes i andre typer varsling. Snøstabiliteten ble estimert framover som snøstabilitetsprognoser. Ved å bruke alle de meteorologiske prognosene som var tilgjengelige, kunne modellen gi prognoser for 10 dager fram i tid. Selv om påliteligheten kan være lav for de fjerneste prognosene, vil forbedringer av værmodeller gjøre det aktuelt å benytte prognoser utover de 3 dagene som Srinivasan et al. (2005) anbefaler. Utløsninga av flere av naturfarene er knyttet direkte eller indirekte til meteorologiske variabler. Kasusstudien av Yu et al. (2007) så på beregning av jordskred i GIS ved å bruke nedbørsmengder. Ved å utnytte oppdaterte

data på Internett kan bidra i forhåndsvarsling av en naturfare. Det må imidlertid tas hensyn til kvaliteten og påliteligheten til værprognosene,

Studien søkte også å øke detaljgraden på analyseresultatene i forhold til dagens snøskredvarsling ved å bruke høyoppløselige data. Prognosene tillot identifisering av enkeltobjekter som utgjorde fare, og ikke bare en faregrad for hele området. Selv om det gjenstår å vise påliteligheten til resultatene, viser metoden at det finnes et potensiale for mer detaljerte beskrivelser av naturfarer ved å utnytte høyoppløselige datasett. Varslene av naturfarer kan dermed bli mer spesifikke, og mottiltak kan utføres for mer avgrensede områder enn tidligere. Det krever imidlertid bruk av effektive og gode modeller.

Multikriterieanalyser brukes ofte i et større rammeverk som for eksempel et varslingssystem. Implementasjonen av snøstabilitetsmodellen er et forslag til hvordan GIS integrert i et verktøy for multikriterieanalyser kan passe inn i organisasjoners rammeverk for naturfarer. Et eksempel på GIS satt i en større sammenheng er International Centre of Geohazards, ICG, prinsipper for bruk av GIS. Bruk av GIS skal «require limited input data and yet are simple enough to be applied to large areas» (Solheim et al. 2005). Bruken av multikriterieanalyse understøtter denne rollen. I studien er multikriterieanalysene implementert som en enkel modell basert på et lite antall variabler. Framtidige studier bør kunne vise om den kan støtte bruk i områder av større areal enn studieområdet. Multikriterieanalysene passer ellers godt inn i ICGs rammeverk (Figur 5-16). Snøstabilitetsmodellen er et eksempel på en GIS-basert fysisk modell i rammeverket. I tillegg kan den bidra i en fare- og risikovurderinga, nivå 3. Skredbanedatasettet inngår på nivå 1.



Figur 5-16 Prinsipper for bruk av GIS ved International Centre of Geohazards (Solheim et al. 2005).

Denne studien og videre forskning på bruk av multikriterieanalyser i snøstabilitetsberegning bør derfor kunne gi relevante erfaringer for varsling av andre typer naturfarer. For vurdering av enkelte typer farer vil liknende datagrunnlag kunne brukes, og dataflyt og oppbygging av modeller kan være direkte relevante. Dette kan for eksempel gjelde jordskred. Andre naturfarer som er mer forskjellige av natur kan også anvende enkelte av studiens erfaringer.

6. Konklusjon

Studien viste at multikriterieanalyser har potensiale til å bidra med ekstra informasjon til bruk i varslingsystemer for snøskred. Studien demonstrerte dette gjennom implementasjon av en snøstabilitetsmodell. En egen applikasjon ble utviklet, og komponenter fra et geografisk informasjonssystem (GIS) ble integrert i applikasjonen for å utføre de romlige analysene.

Multikriterieanalysene produserte resultater med høyere romlig oppløsning enn dagens snøskredvarsling. Oppløsningen ble utnyttet til å gi en vurdering av stabiliteten for hver enkel skredbane. Sammenlikninger av snøstabilitetsindeksen mot meteorologiske prognoser og mot daglige snøskredvarsler indikerer at multikriterieanalysene kan gi realistiske resultater. Dette tyder på at multikriterieanalyser kan inngå som en del av varslingsystemer for snøskredfare.

Applikasjonen utnyttet datakilder på Internett for å hente ut meteorologiske data. Utfordringer i formater og utveksling av data hindret imidlertid en optimal håndtering av dataene. Økt interoperabilitet bør i framtida forenkle datautvekslinga i multikriterieanalysene.

Selv om nyere teknologi ble utnyttet for å anskaffe meteorologiske data, viste studien at dataene og datastrukturene ikke var optimale for bruk i multikriterieanalysene. Alternative meteorologiske datakilder kan føre til at kvaliteten til analysene blir bedre.

Studien diskuterte også muligheter for forbedringer av andre datasett. Spesielt vil et bedre strukturert datasett for skredbanene hjelpe til i identifiseringen av farlige baner.

Erfaringer gjort i bruk av multikriterieanalysen for beregning av snøstabilitet kan også være relevante i forbindelse med vurderinger av andre naturfarer. Bruk av høyoppløselig datagrunnlag i analysene kan gi beslutningstakere mer detaljerte romlige analyser av farene, samtidig som tilgang til nye datakilder på Internett gir nye muligheter.

Videre studier bør både se på hvordan ny teknologi, større interoperabilitet og nye datakilder kan øke nytten av multikriterieanalyser i varsling av naturfarer.

7. Litteraturliste

- Antoniou, G. and F. v. Harmelen (2004). A semantic Web primer. Cambridge, Mass., MIT Press.
- Attorre, F., M. Alfo, et al. (2007). "Comparison of interpolation methods for mapping climatic and bioclimatic variables at regional scale." International Journal of Climatology **27**(13): 1825-1843.
- Bakkehøi, S. (1987). "Snow avalanche prediction using a probabilistic method,." Avalanche Formation, Movement and Effects. Proceedings of the Symposium, September 1986. **162**: 549-555.
- Barry, R. G. (1992). Mountain weather and climate. London, Routledge.
- Bishr, Y. (1998). "Overcoming the semantic and other barriers to GIS interoperability." International Journal of Geographical Information Science **12**(4): 299-314.
- Brabec, B. and R. Meister (2001). A nearest-neighbor model for regional avalanche forecasting. Annals of Glaciology, Vol 32, 2001. **32**: 130-134.
- Brundl, M., H. J. Etter, et al. (2004). "IFKIS - a basis for managing avalanche risk in settlements and on roads in Switzerland." Natural Hazards and Earth System Sciences **4**(2): 257-262.
- Chakhar, S. and J.-M. Martel (2003). "Enhancing geographical information systems capabilities with multi-criteria evaluation functions." Journal of Geographic Information and Decision Analysis **7**: 47-71.
- Chakhar, S. and V. Mousseau (2007). "An algebra for multicriteria spatial modeling." Computers Environment and Urban Systems **31**(5): 572-596.
- Chang, Y. S. and H. D. Park (2006). "XML Web service-based development model for Internet GIS applications." International Journal of Geographical Information Science **20**(4): 371-399.
- Conway, H. and C. Wilbour (1999). "Evolution of snow slope stability during storms." Cold Regions Science and Technology **30**(1-3): 67-77.
- Corcoles, J. E. and P. Gonzalez (2004). Querying spatial resources. An approach to the semantic geospatial web. Web Services, E-Business, and the Semantic Web. **3095**: 41-50.
- DeMers, M. N. (2000). Fundamentals of geographic information systems. New York, Wiley.
- Durand, Y., E. Brun, et al. (1993). "A meteorological estimation of relevant parameters for

- snow models." Annals of glaciology **18**: 65-71.
- Durand, Y., G. Giraud, et al. (1999). "A computer-based system simulating snowpack structures as a tool for regional avalanche forecasting." Journal of Glaciology **45**(151): 469-484.
- Durand, Y., G. Guyomarc'h, et al. (2005). "Improvement of a numerical snow drift model and field validation." Cold Regions Science and Technology **43**(1-2): 93-103.
- Eagleman, J. R. (1980). Meteorology: the atmosphere in action. New York, Van Nostrand.
- Einstein, H. H. and R. Sousa (2007). Warning systems for natural threats, Taylor & Francis. **1**: 3 - 20.
- Furdada, G., G. Marti, et al. (1995). "Avalanche mapping and related GIS-applications in the Catalan-Pyrenees." Surveys in Geophysics **16**(5-6): 681-693.
- Föhn, P. M. B. (1987). "Stability index and various triggering mechanisms. In Avalanche Formation, movements and effects." **1987**(162): 195-207.
- Gomes, E. G. and M. P. E. Lins (2002). "Integrating Geographical Information Systems and multi-criteria methods: A case study." Annals of Operations Research **116**(1-4): 243-269.
- Hamilton, R. (1997). Report on Early Warning Capabilities for Geological Hazards. Washington D.C., United Nations.
- Haraldsdottir, S. H., H. Olafsson, et al. (2004). A system for prediction of avalanche hazard in the windy climate of Iceland. Annals of Glaciology, Vol 38, 2004. **38**: 319-324.
- Haugen, J. E., Aspelien, T., Homleid, M., Køltzow, M., Vignes, O. (2008). Operasjonell Hirlam med 12km, 8km og 4km gitter, met.no.
- Helfrich, S. R., D. McNamara, et al. (2007). "Enhancements to, and forthcoming developments in the Interactive Multisensor Snow and Ice Mapping System (IMS)." Hydrological Processes **21**(12): 1576-1586.
- Jaedicke, C. (2001). Drifting snow and snow accumulation in complex Arctic terrain: field experiments and numerical modelling. [Bergen], Geophysical Institute, University of Bergen. **no. 3-2001**: 1 b.
- Jankowski, P. (1995). "Integrating geographical information systems and multiple criteria decision-making methods." International Journal of Geographical Information Systems **9**(3): 251-273.
- Kalnay, E., S. J. Lord, et al. (1998). "Maturity of operational numerical weather prediction: Medium range." Bulletin of the American Meteorological Society **79**(12): 2753-2769.

- Karnatak, H. C., S. Saran, et al. (2007). "Multicriteria spatial decision analysis in web GIS environment." Geoinformatica **11**(4): 407-429.
- Killingtveit, A., L. E. Pettersson, et al. (2003). "Water balance investigations in Svalbard." Polar Research **22**(2): 161-174.
- Kjekshus, O. (2008, Juli 2007). "Forprosjekt Opplegg for forvaltning, drift og vedlikehold av terrengdata." Aksessert 18.04, 2008, fra http://www.statkart.no/Norge_digitalt/Norsk/Basisdata/Hoydedata/Horing_terrengdata/filestore/Norge_Digitalt_ny/Basisdata/Hydedata/Forprosjektrapport_terrengdata.pdf.
- Kokkonen, T., A. Jolma, et al. (2003). "Interfacing environmental simulation models and databases using XML." Environmental Modelling & Software **18**(5): 463-471.
- Kronholm, K., D. Vikhamar-Schuler, et al. (2006). Forecasting snow avalanche days from meteorological data using classification trees; Grasdalen Western Norway. Proceedings, International Snow Science Workshop Telluride, Colorado.
- Köhler, P. (2006). "Towards an open information infrastructure for disaster research and management: Data management and information systems inside DFNK." Natural hazards **38**(1-2): 141-157.
- Köhler, P. G. (2006). "Towards an open information infrastructure for disaster research and management: Data management and information systems inside DFNK." Natural hazards **38**(1-2): 141-157.
- Kållberg, P. and A. Montani (2006). "A case study carried out with two different NWP systems." Natural Hazards and Earth System Sciences **6**(5): 755-760.
- "Lab Annual Report." Research Applications Laboratory, The National Center for Atmospheric Research, 2007. Hentet 01.05.2008, 2007, fra <http://www.ral.ucar.edu/lar/2007/>.
- LaChapelle, E. R. (1980). "The fundamental processes in conventional avalanche forecasting." Journal of Glaciology **26**(94): 75-84.
- Lake, R. (2004). Geography mark-up language (GML): foundation for the geo-web. Chichester, Wiley.
- Larman, C. (2004). Applying UML and patterns: an introduction to object-oriented analysis and design and iterative development. Upper Saddle River, N.J., Prentice Hall PTR.
- Lehning, M., P. Bartelt, et al. (1999). "model calculations for avalanche warning based upon a new network of weather and snow stations." Cold Regions Science and Technology **30**(1-3): 145-157.

- Lehning, M., J. Doorschot, et al. (2000). A snowdrift index based on SNOWPACK model calculations. Annals of Glaciology, Vol 31, 2000. **31**: 382-386.
- Lehning, M., C. Fierz, et al. (2004). Modeling snow instability with the snow-cover model SNOWPACK. Annals of Glaciology, Vol 38, 2004. **38**: 331-338.
- Lied, K. and K. Kristensen (2003). Snøskred: håndbok om snøskred. Nesbru, I samarbeid med NGI, Norges geotekniske institutt.
- Maggioni, M. and U. Gruber (2003). "The influence of topographic parameters on avalanche release dimension and frequency." Cold Regions Science and Technology **37**(3): 407-419.
- McCarthy, J. D., P. A. Graniero, et al. (2008). "An integrated GIS-expert system framework for live hazard monitoring and detection." Sensors **8**(2): 830-846.
- McClung, D. and P. Schaerer (1993). The avalanche handbook. Seattle, Wash., Mountaineers.
- McClung, D. M. (2002). "The elements of applied avalanche forecasting - Part II: The physical issues and the rules of applied avalanche forecasting." Natural hazards **26**(2): 131-146.
- McClung, D. M. and J. Tweedy (1993). "Characteristics of avalanching - Kootenay pass, British Columbia, Canada." Journal of Glaciology **39**(132): 316-322.
- "geonorge.no - Nasjonal geografisk portal". Aksessert 05.03.2008, 2008, fra <http://www.geonorge.no/Portal/DiscoveryServlet>.
- met.no. "Observasjoner fra land." Aksessert 01.03, 2008, fra http://met.no/Meteorologi/A_male_varet/Observasjoner_fra_land/.
- Mulligan, M. and J. Wainwright (2004). Environmental modelling: finding simplicity in complexity. Chichester, Wiley.
- Nishimura, K., E. Baba, et al. (2005). "Application of the snow cover model SNOWPACK to snow avalanche warning in Niseko, Japan." Cold Regions Science and Technology **43**(1-2): 62-70.
- Norem, H. (1993). Snøvern. Nr.167 i vegvesenets håndbokserie. Oslo, Statens vegvesen.
- Pokrajac, D., K. Amoako, et al. (2003). Data mining in geosciences. Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Service, 2003. TELSIS 2003. 6th International Conference on.
- Puri, S. K. (2007). "Integrating scientific with indigenous knowledge: Constructing knowledge alliances for land management in India." Mis Quarterly **31**(2): 355-379.
- Purves, R. S., D. J. Medyckyj-Scott, et al. (2005). "The e-MapScholar project--an example of

- interoperability in GIScience education." Computers & geosciences **31**(2): 189-198.
- Roeger, C., D. McClung, et al. (2001). "A verification of numerical weather forecasts for avalanche prediction." Cold Regions Science and Technology **33**(2-3): 189-205.
- Roeger, C., R. Stull, et al. (2003). "Verification of mesoscale numerical weather forecasts in mountainous terrain for application to avalanche prediction." Weather and Forecasting **18**(6): 1140-1160.
- Rutevise planer for stamvegnettet, Statens vegvesen. **2006**.
- Ryan, B. C. (1977). "Mathematical-model for diagnosis and prediction of surface winds in mountainous terrain." Journal of Applied Meteorology **16**(6): 571-584.
- Rzepa, H. S., A. Wheat, et al. (2006). "ChemSem: An extensible and scalable RSS-based seminar alerting system for scientific collaboration." Journal of Chemical Information and Modeling **46**(3): 985-990.
- Skaugen, T. (2002). "A spatial disaggregation procedure for precipitation." Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques **47**(6): 943-956.
- Solheim, A., R. Bhasin, et al. (2005). "International Centre for Geohazards (ICG): Assessment, prevention and mitigation of geohazards." Norwegian Journal of Geology **85**(1-2): 45-62.
- Srinivasan, K., A. Ganju, et al. (2005). "Usefulness of mesoscale weather forecast for avalanche forecasting." Current Science **88**(6): 921-926.
- Stefanovic, I. L. (2003). "The contribution of philosophy to hazards assessment and decision making." Natural hazards **28**(2-3): 229-247.
- Stocker-Mittaz, C. (2001). Permafrost Distribution Zürich, Universität Zürich **Dr. sc. nat.**
- "Terrengmodeller. Landsdekkende digital terrengmodell i 25 eller 50 meters grid." Norsk eiendomsinformasjon AS. Aksessert 2. april 2008, fra <http://www.infoland.no/NeDownload/FileServingServlet?seq=03&internal=true&file=25-Terrengmodell.pdf>.
- Tisler, P., E. Gregow, et al. (2007). "Wind field prediction in coastal zone: Operational mesoscale model evaluation and simulations with increased horizontal resolution." Journal of Coastal Research **23**(3): 721-+.
- Tok, W., S. Bressan, et al. (2007). Danaïdes: Continuous and Progressive Complex Queries on RSS Feeds. Advances in Databases: Concepts, Systems and Applications: 1115-1118.
- Vatsavai, R. R., S. Shekhar, et al. (2006). UMN-MapServer: A high-performance,

interoperable, and open source web mapping and geo-spatial analysis system.

Geographic Information Science, Proceedings. **4197**: 400-417.

Voisard, A. and H. Schweppe (1998). "Abstraction and decomposition in interoperable GIS."

International Journal of Geographical Information Science **12**(4): 315-333.

Yu, F. C., C. Y. Chen, et al. (2007). "A web-based decision support system for slopeland hazard warning." Environmental Monitoring and Assessment **127**(1-3): 419-428.

8. Figurliste

Figur 2-1 Nivåer for interoperabilitet i GIS (Bishr 1998)	13
Figur 2-2 De to typene skred, flakskred og løssnøskred (Norem 1993).	16
Figur 2-3 Tre klasser for tolking av snøstabilitet. Informasjon med høyest entropi er plassert øverst (McClung 2002).	18
Figur 2-4 Kartlagt skredbane (stiplet linje) og faktiske skred Furdada et al. (1995).	20
Figur 3-1 Årlig nedbør i perioden 1971-2000. Data fra meteorologisk institutts WMS-tjeneste (http://norgenacloudy.oslo.dnmi.no/wmsmapserv).	24
Figur 3-2 Grasdalen med Riksvei 15. Snøskredutsatte områder markert.	25
Figur 3-3 Lengdeprofil og nedbørsmengde langs RV 15 over Strynefjellet. (Norem 1993). ..	26
Figur 3-4 Vindroser for desember-april 1998-2007 fra eklima.met.no	26
Figur 3-5 Kart over veinettet i regionene.	27
Figur 3-6 Årlig antall timer veistengning av RV 15 sammenliknet med E16 Filefjell og Rv 52 Hemsedalsfjellet (Statens vegvesen 2006).	28
Figur 4-1 Observert skjærstyrke og snøtetthet, og en «best-fit» eksponensiell kurve (heltrukket linje). De andre linjene viser standardavvik (Conway og Wilbour 1999).	30
Figur 4-2 Terrengmodellen med dekning av de tre områdene som ble brukt i studien.	32
Figur 4-3 Utdrag fra svar fra yr.no på forespørsel etter varsel for Grasdalen 24. Mars 2008 kl 15:30.	33
Figur 4-4 Skredbanene	34
Figur 4-5 Sekvensiell over snøstabilitetsmodellen.	35
Figur 4-6 Oversikt over snøstabilitetsmodellen.	36
Figur 4-7 Snødriftsmodellen («Model snowdrift»).	36
Figur 4-8 Modell for beregning av snøstabilitet («Calculate snow stability»).	37
Figur 4-9 Prinsipp for uttrekk av minimum stabilitetsindeks til skredbane.	37
Figur 4-10 Verktøykasse med delmodeller. Utsnitt fra ArcMap.	38
Figur 4-11 Snøstabilitetsapplikasjonens brukergrensesnitt	39
Figur 4-12 Analysetida fordelt på prognoser (varslingsdag) for 4 ulike kjøring.	40
Figur 4-13 Analysetida fordelt på delprosess.	41
Figur 4-14 Eksempler på analysetider for snødriftsmodellen.	42
Figur 4-15 Analysetid i forhold til områdets størrelse i piksler	43

Figur 4-16 Forholdet mellom de 4 daglige tidsperiodene for yr.no og den daglige prognosen for snøstabilitetsmodellen.	45
Figur 4-17 Eksempel på snøstabilitetskart: Prognose for 26.02.2008 som varslet 16.02.2008.	46
Figur 4-18 Utsnitt av animasjon laget 15.02.2008. Nederste stripe viser alle klippene som utgjør videoen.....	46
Figur 4-19 Dataflyt i applikasjonen.	47
Figur 4-20 Forenklet eksempel på omstrukturering av meteorologiske data. Celler med vertikale striper viser ei originalfil, mens celler med horisontale striper viser ei omstrukturert shapefil.	48
Figur 4-21 Datastruktur for meteorologiske variabler.	48
Figur 4-22 Eksempel på nullstilling av akkumulert nedbør.	52
Figur 4-23 Antall perioder med temperatur over 0 °C (venstre) og nullstillingslaget (høyre). Simulerte resultater.	52
Figur 4-24 Midling av vindhastighet. Gjennomsnittlig vindhastighet mot observert vindhastighet 18.1.2008 – 29.1.2008.	53
Figur 4-25 Modellert vindfelt i Grasdalen ved 195° vindretning.....	55
Figur 4-26 Modellert vindfelt i Grasdalen ved 105° vindretning.....	55
Figur 4-27 Vindretning 285°.	57
Figur 4-28 Helningens sensitivitet til feil i høydeforskjeller mellom to naboceller.	58
Figur 4-29 Snødriftsmodellen sensitivitet overfor feil i helning vist for fire tilfeller av forskjell mellom vindretning (wd) og helningsretning (a).	59
Figur 4-30 Skjærkraftens sensitivitet overfor feil i høydeforskjell mellom to naboceller.	60
Figur 4-31 Sammenlikning av nedbør for 24-timersperioder mellom Stryn-Kroken og Fonnbu	62
Figur 4-32 Relativ vindfordeling i testperioden i 45° inndelinger.	62
Figur 4-33 Sammenlikning av vindhastigheter for Kvitenova (enkeltobservasjon) og Fonnbu (6-timers gjennomsnitt).	63
Figur 4-34 Sammenlikning av temperatur mellom Fonnbu og Kvitenova i studieperioden. Stiplet triangel indikerer spredningsområdet for temperaturinversjon.	63
Figur 4-35 Sammenlikning av prognose og observert nedbør siste 24-timer.	64
Figur 4-36 Treffrate for nedbørsprognoser mot observasjoner for 24-timersnedbør. Terskelverdi = 2 mm nedbør.	65

Figur 4-37 Varslede og observerte vindhastigheter med lineær trendlinje for området.	65
Figur 4-38 Treffrate for vindhastigheten i testperioden for observert vindhastighet mot varslet vindhastigheten. Terskelverdi: 5 m/s.	66
Figur 4-39 Treffprosent for vindretning (forskjellen mellom prognoser og observasjoner $\leq 45^\circ$).	66
Figur 4-40 Sammenlikning av observert og varslet temperatur med lineære trendlinjer.	67
Figur 4-41 Treffrate for temperaturprognoser mot observasjoner. Kriterie: Temperatur $> 0^\circ\text{C}$	67
Figur 4-42 Observert og varslet nedbør for analysedag 11.2.	68
Figur 4-43 Observert og varslet nedbør for analysedag 13.2.	69
Figur 4-44 Antall skredbaner inndelt i stabilitet for analysedagen 13.2.	70
Figur 4-45 Varslet og observert nedbør pr 14.02 kl 03:00.	70
Figur 4-46 Antall skredbaner inndelt i stabilitet for analysedagen 14.2.	71
Figur 4-47 Varslet og observert nedbør pr 15.02.	72
Figur 4-48 Antall skredbaner inndelt i stabilitet for analysedagen 15.2.	73
Figur 4-49 Varslet og observert nedbør pr 18.02.	73
Figur 4-50 Antall skredbaner inndelt i stabilitet for analysedagen 18.2.	74
Figur 4-51 Varslet og observert nedbør pr 19. 2.	75
Figur 4-52 Antall skredbaner inndelt i stabilitet for analysedagen 19.2.	76
Figur 4-53 Den europeiske skredfareskalaen (Lied og Kristensen 2003).	76
Figur 4-54 Faregrad for Strynefjellet som varslet av NGI for perioden 9.2.2008 – 20.2.2008.	77
Figur 4-55 Andel baner (%) med lav stabilitet fra snøstabilitetsmodellens prognoser.	78
Figur 5-1 Eksempel på erstatning av delmodell med mer kompleks modell	87
Figur 5-2 Eksempel på 3-dimensjonal presentasjon av stabiliteten laget i ArcGIS-programmet ArcScene.	90
Figur 5-3 Webside for observasjoner fra Kvitenova. URL: http://vegklima.vegvesen.no/	94
Figur 5-4 Utdrag fra et resultat fra «locationforecast», api.met.no. Aksessert 24. mars 2008 kl 15:30.	97
Figur 5-5 Skjermdump fra NGIs interne skredvarslingssider.	102
Figur 5-6 Kart og 3D-kart av skredbanen Oppljosegga Nord. 3D-kartet er som sett fra nordvest.	104

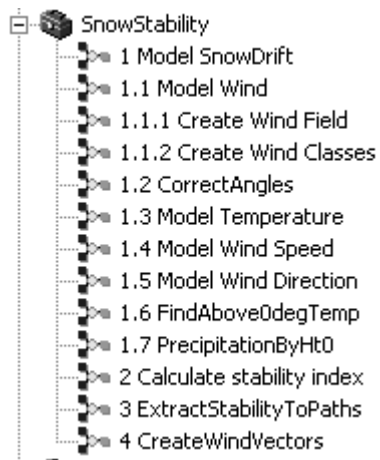
Figur 5-7 3D-kart av «Skjæringsdalen Mitt». Høydekoter med 50 m ekvidistanse er lagt over.	104
Figur 5-8 3D-kart av de sørlige skredbanene sett fra nordvest. Skredbanenes soner indikert. A=Utløsningssone, B=Skredløp, C=Utløpsområde.	105
Figur 5-9 Skredbanen «Godtidfonn» inndelt i soner i henhold til høyde: 350-500 moh, 500- 1500 moh. og over 1500 moh. Ekvidistanse: 50 m.	106
Figur 5-10 3D-kart av øvre del av «Godtidfonn» sett fra nordvest. Snøstabilitet 23.02.2008 som varslet 17.02.2008 kl 03:00.	107
Figur 5-11: 3-D-kart av skredbanene ved Raudnova sett fra nord. Snøstabilitet 23.02.2008, varslet 17.02.2008 kl 03:00.	108
Figur 5-12: 3-D-kart av «Storurfonn» sett fra sørøst. Snøstabilitet 23.02.2008, varslet 17.02.2008 kl 03:00.	108
Figur 5-13 Maksimum forflytning fra loside ved snødrift med og uten vindstyrke. Vindstyrkefaktoren i parentes.	110
Figur 5-14 Maksimum forflytning fra loside ved snødrift med og uten vindstyrke. Vindstyrkefaktoren i parentes.	111
Figur 5-15 Nettstedet seNorge.no med nysnømengde.	116
Figur 5-16 Prinsipper for bruk av GIS ved International Centre of Geohazards (Solheim et al. 2005).	120

9. Tabeller

Tabell 1: Datagrunnlaget i snøstabilitetsmodellen.....	31
Tabell 2 Programvare brukt i utviklinga av løsningen:.....	35
Tabell 3 Analysetider for snøstabilitetsmodellen for fire ulike utsnitt.....	42
Tabell 4 Metode brukt for beregning av treffrate for vindhastighet (WDSP).....	64
Tabell 5 Utvalgte snøstabilitetskart som varslet 13.2	69
Tabell 6 Utvalgte snøstabilitetskart som varslet 14.02	71
Tabell 7 Utvalgte snøstabilitetskart som varslet 15.2	72
Tabell 8 Utvalgte snøstabilitetskart som varslet 18.2	74
Tabell 9 Utvalgte snøstabilitetskart som varslet 19.2	75
Tabell 10 Tekstlig skredfarevurdering (forkortet) fra NGI for Strynefjellet 9.2.2008 – 20.2.2008. Basert på beskrivelser i Vedlegg E.	77
Tabell 11 Sammenlikning av yr.no og api.met.no	98
Tabell 12 Statistikk for snødriftsmodellen for gitte parametre. F = vindstyrkefaktor, P = vindstyrkepotens.....	112

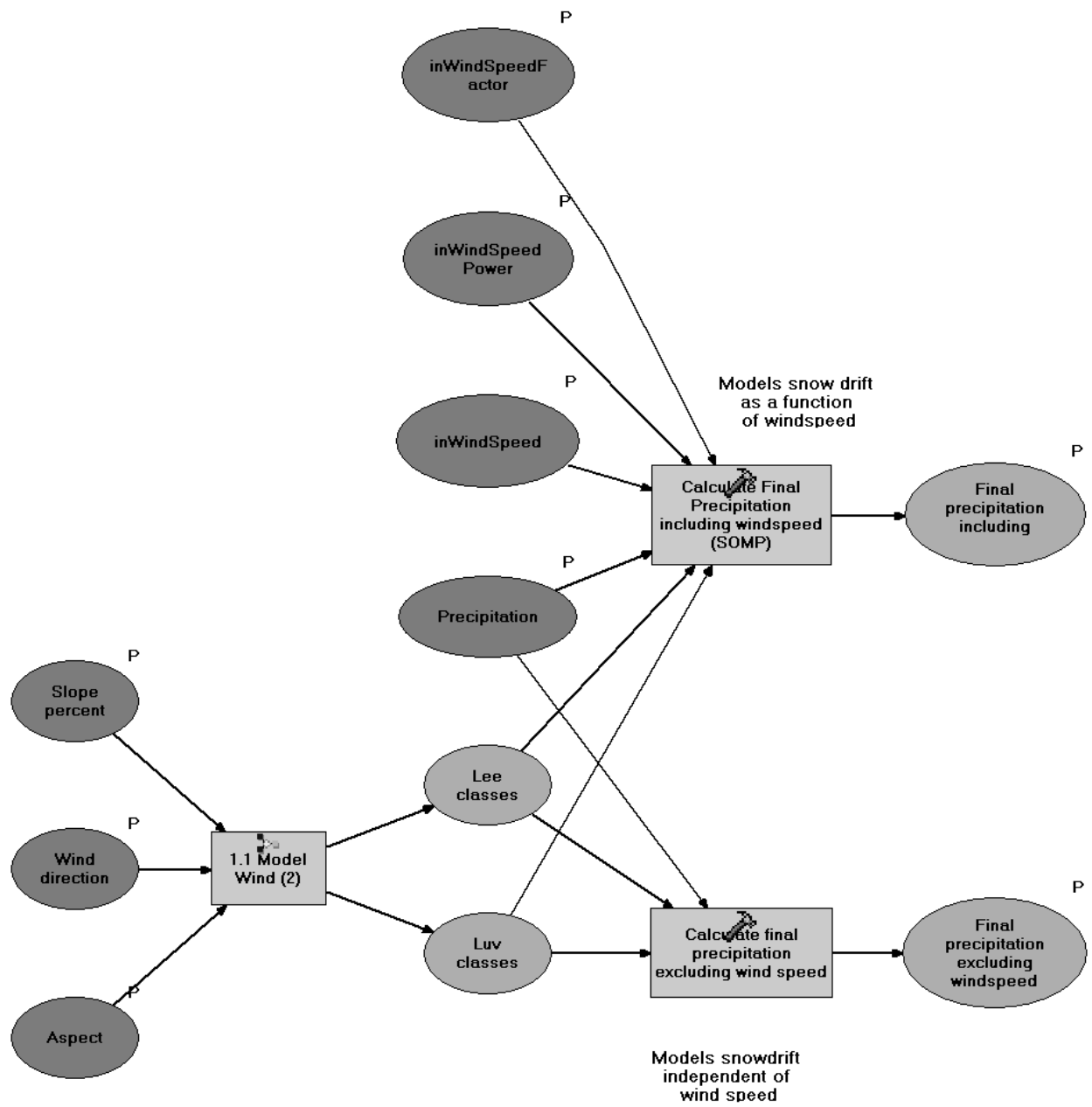
Vedlegg A Modeller

Modeller i ArcGIS ModelBuilder:

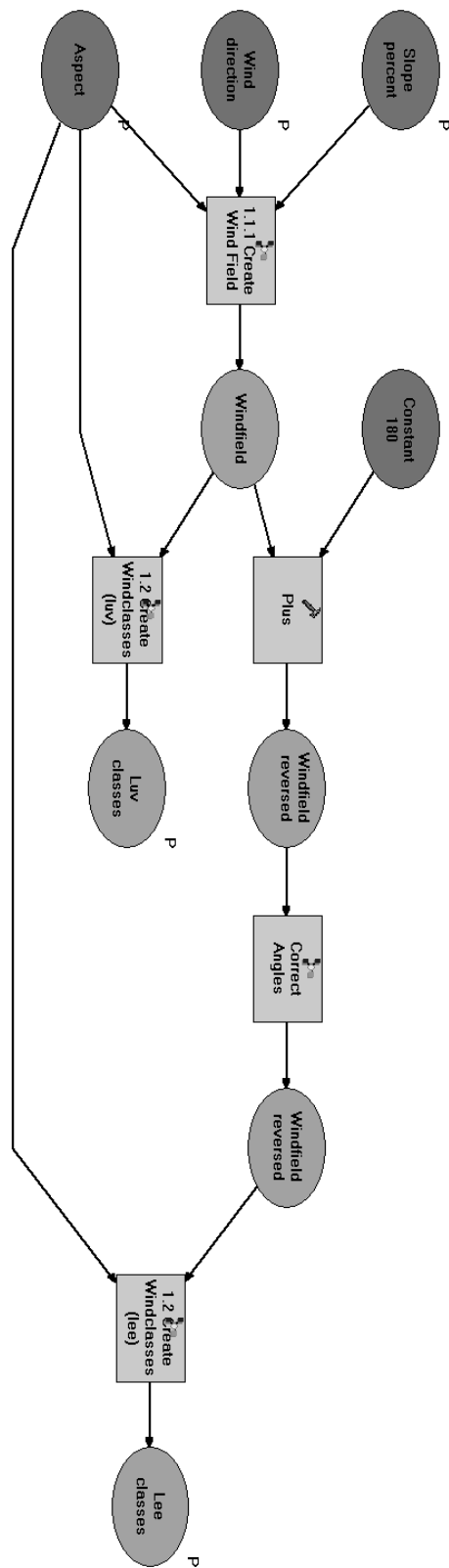


Modellene er strukturert hierarkisk, slik at modell 1.1 er en delmodell i modell 1. Unntak for modell 1.2 – 1.7, som ble kjørt utenom modell 1.

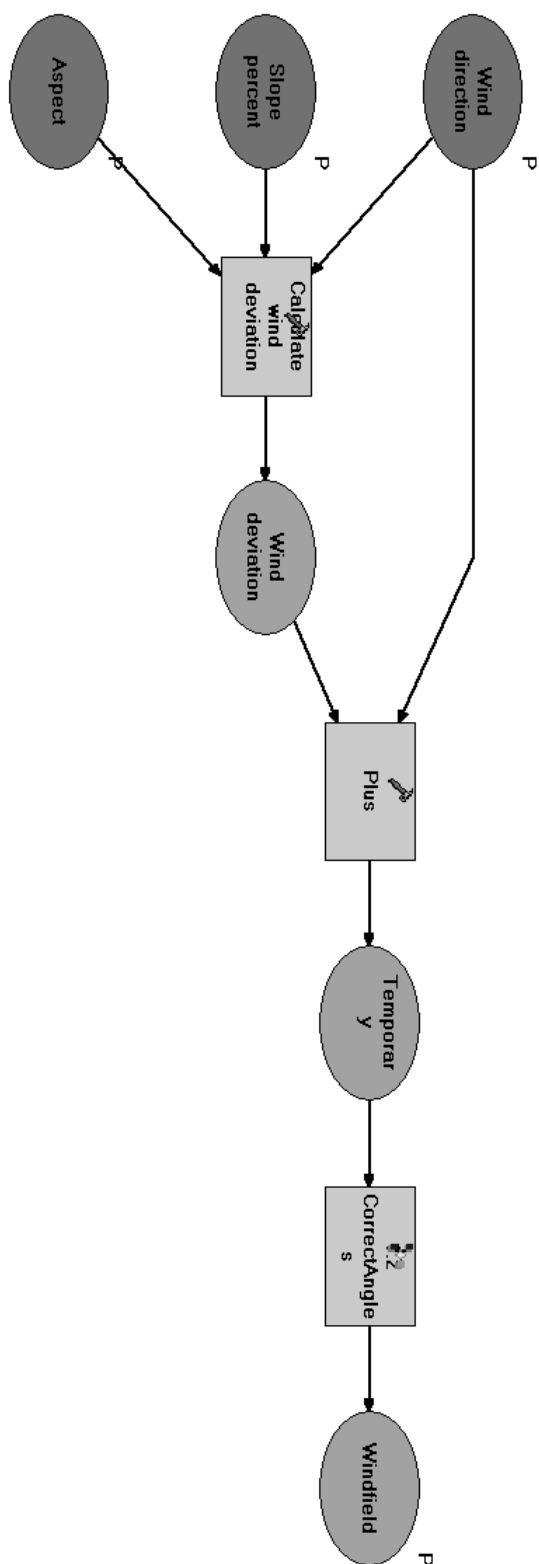
Modell nr 1, modellering av snødrift:



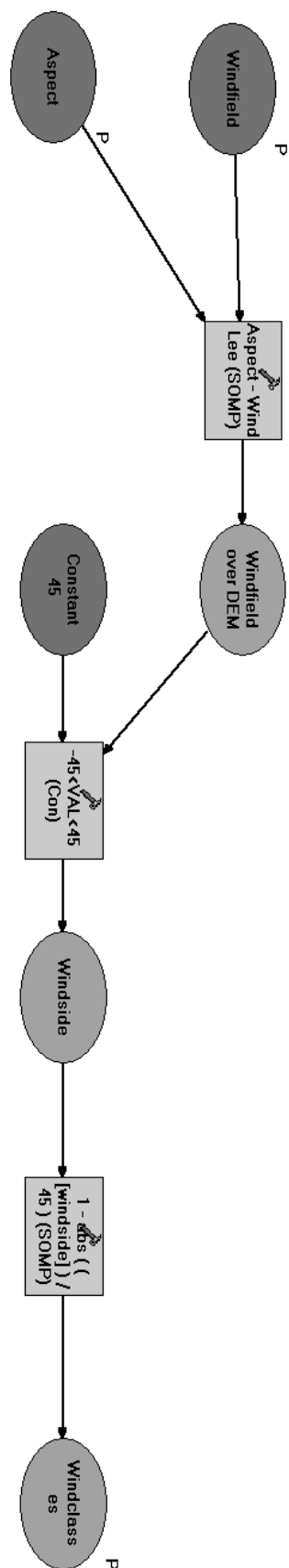
Modell nr 1.1, modellering av vind:



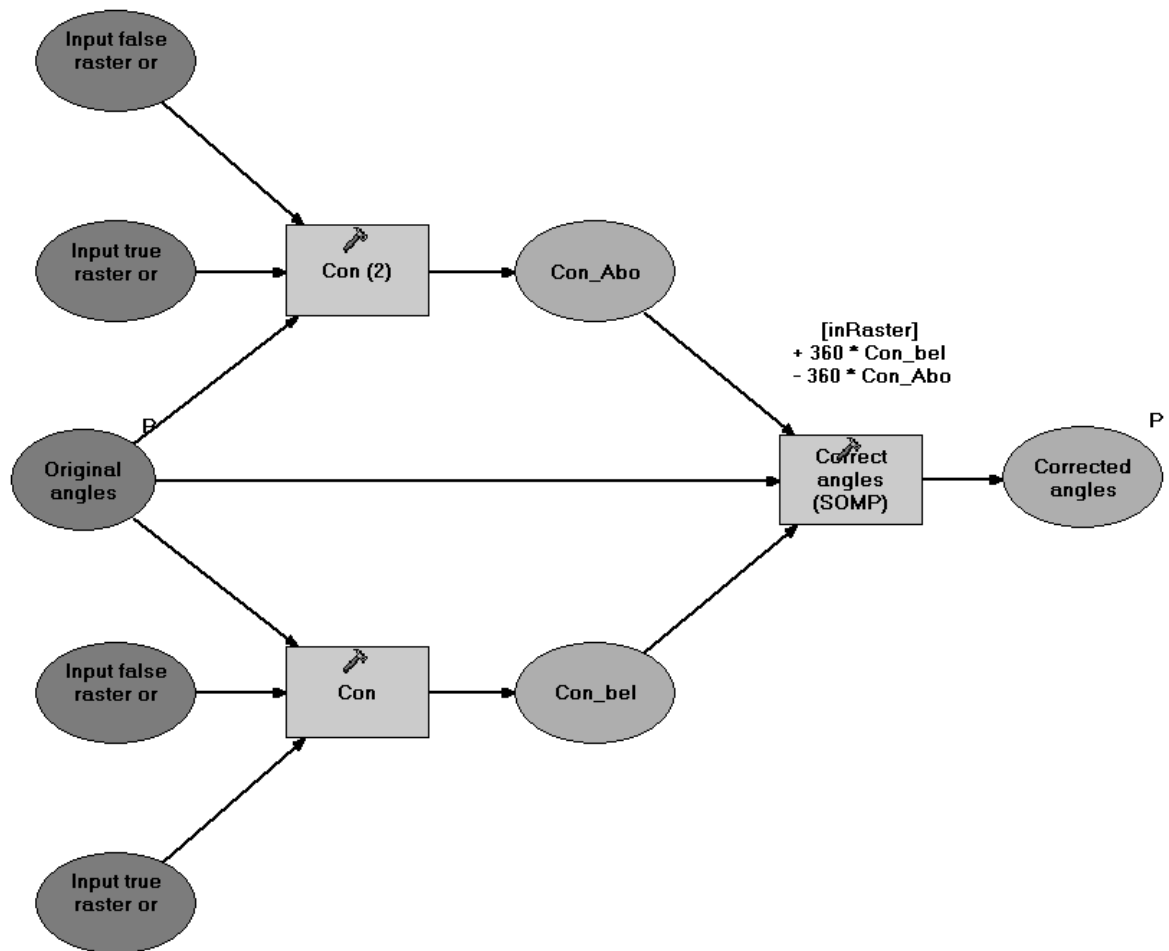
Modell nr 1.1.1, modellering av vindretning/vindfelt:



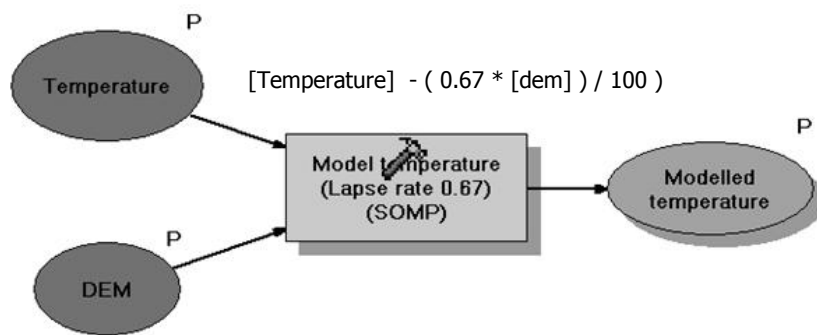
Modell nr 1.1.2, modellering av le- og losider:



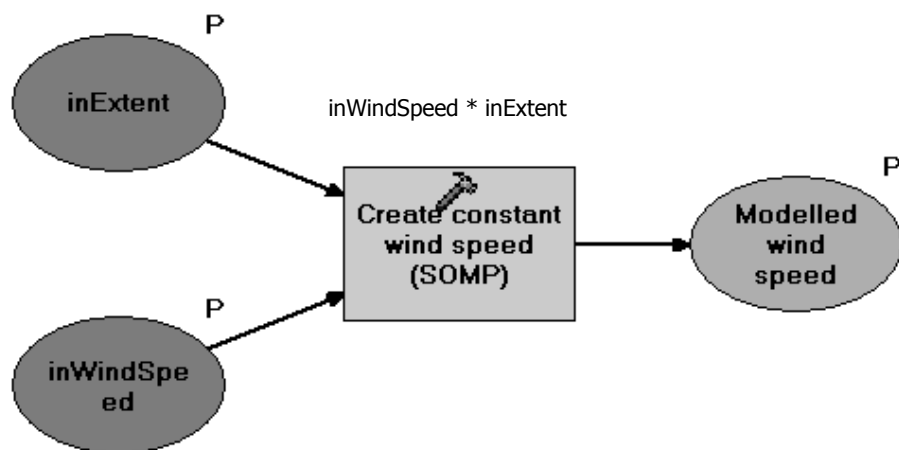
Modell nr 1.2, retting av vinkler (gi vinkler verdier mellom 0° og 360°):



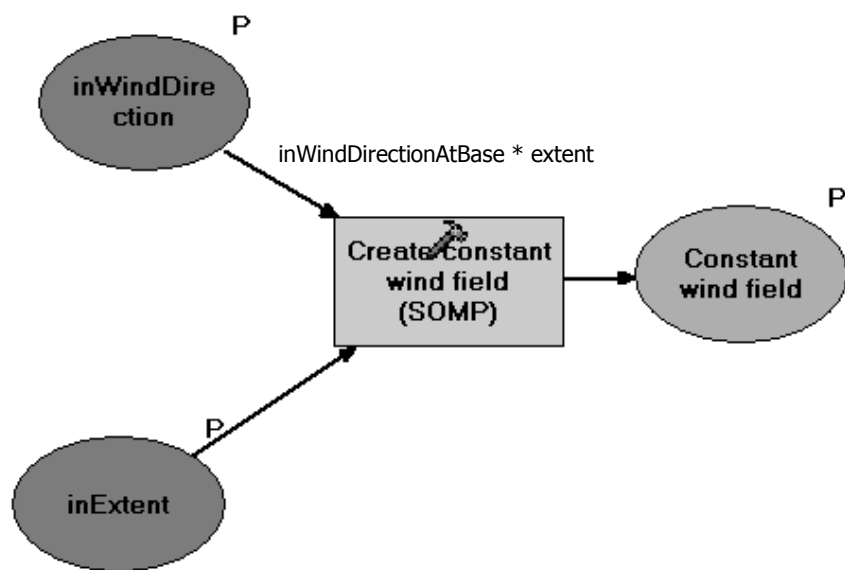
Modell nr 1.3, modellering av temperatur:



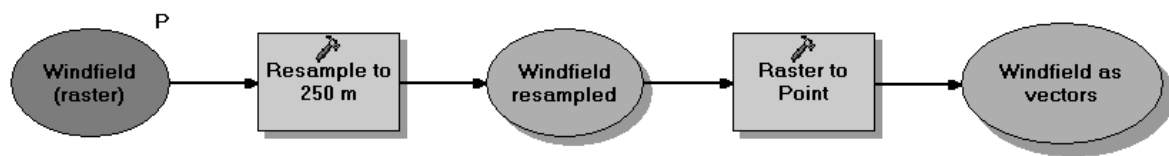
Modell nr 1.4, modellering av vindhastighet (settes til konstant verdi):



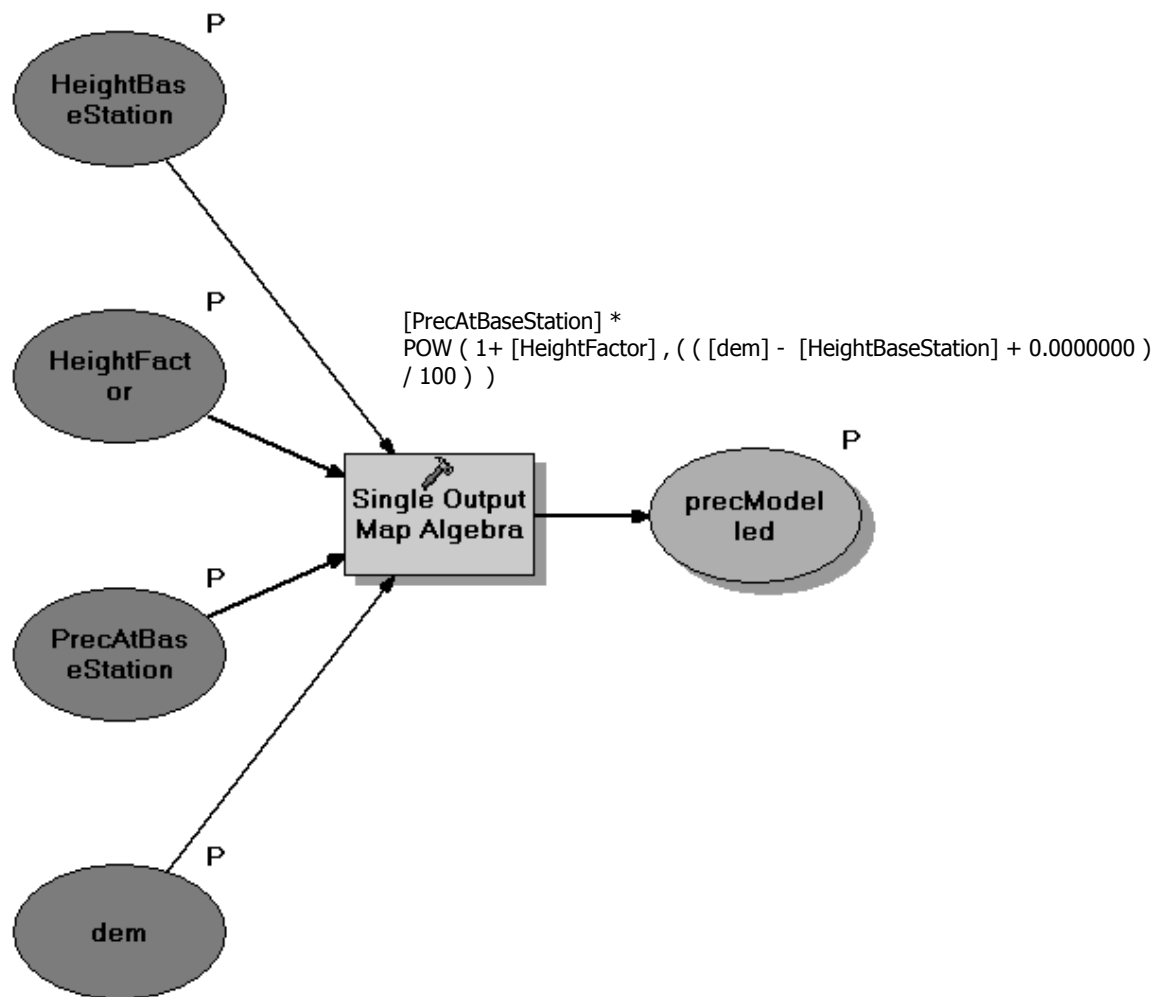
Modell nr 1.5, modellering av vindretning/vindfelt (settes til konstant verdi):



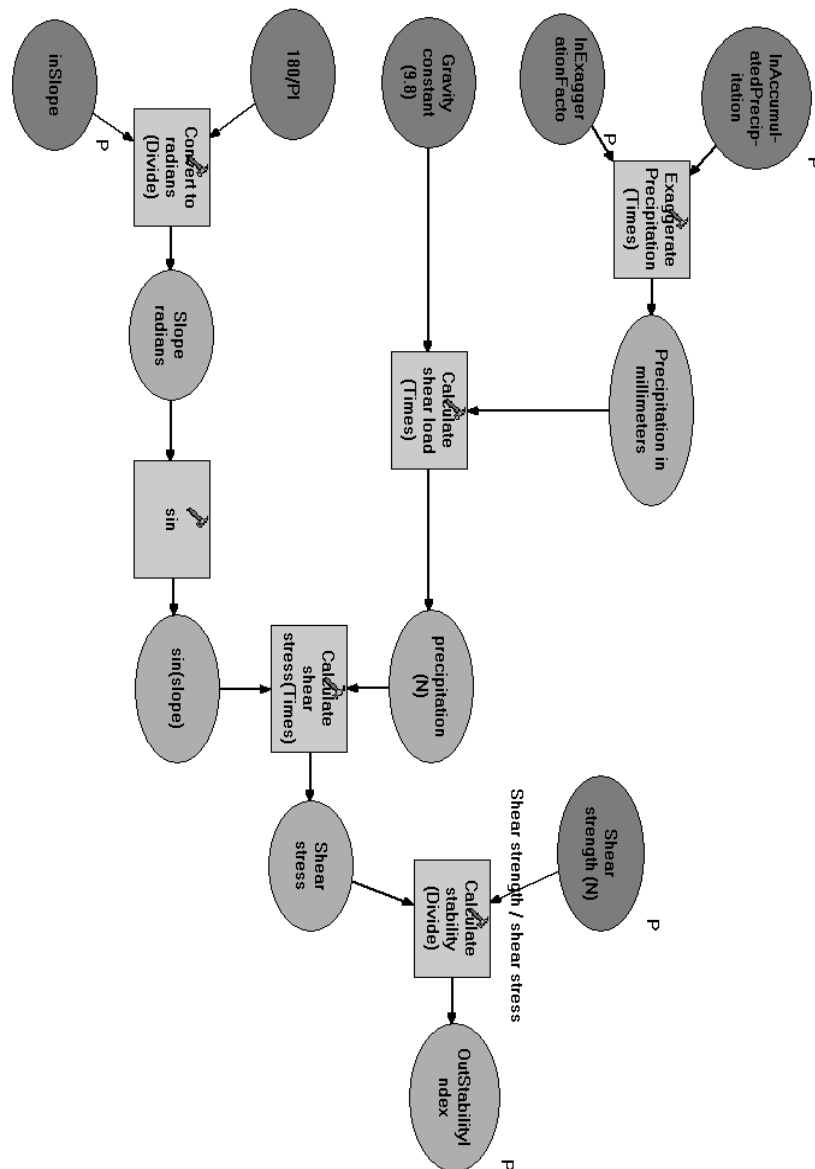
Modell nr 1.6, modellering av celler med temperatur over 0 °C:



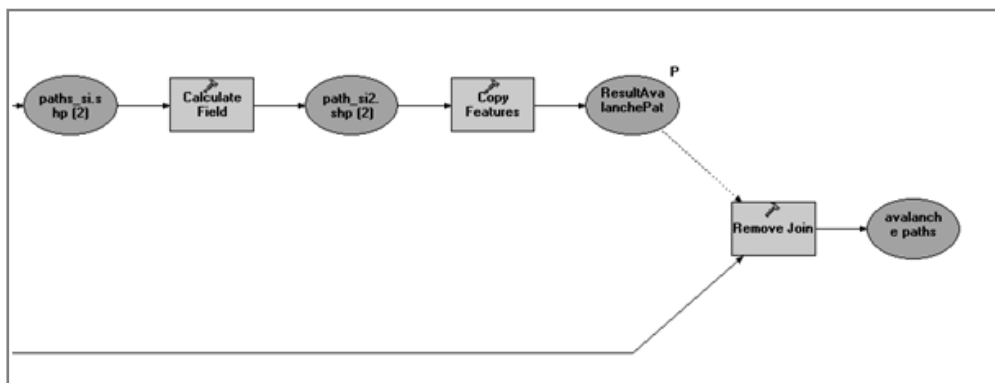
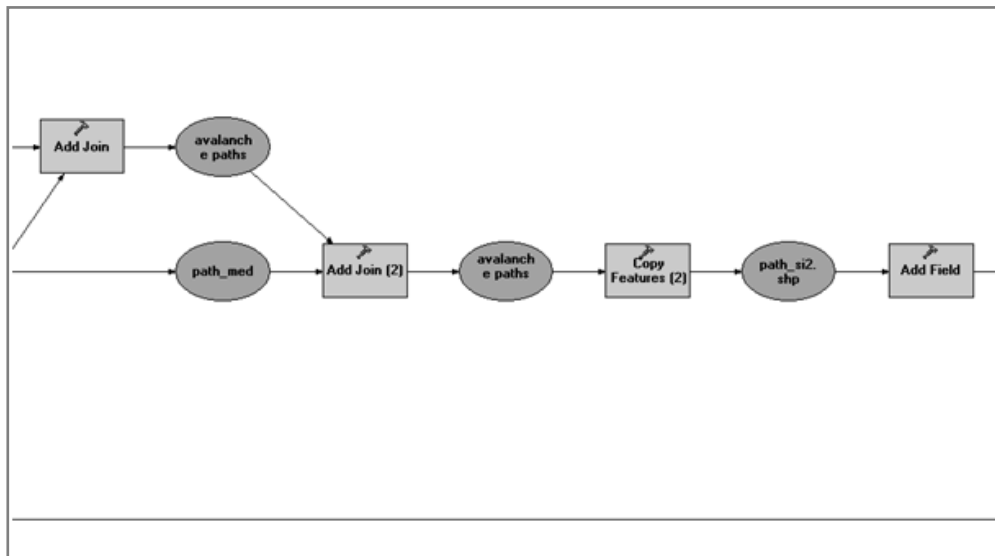
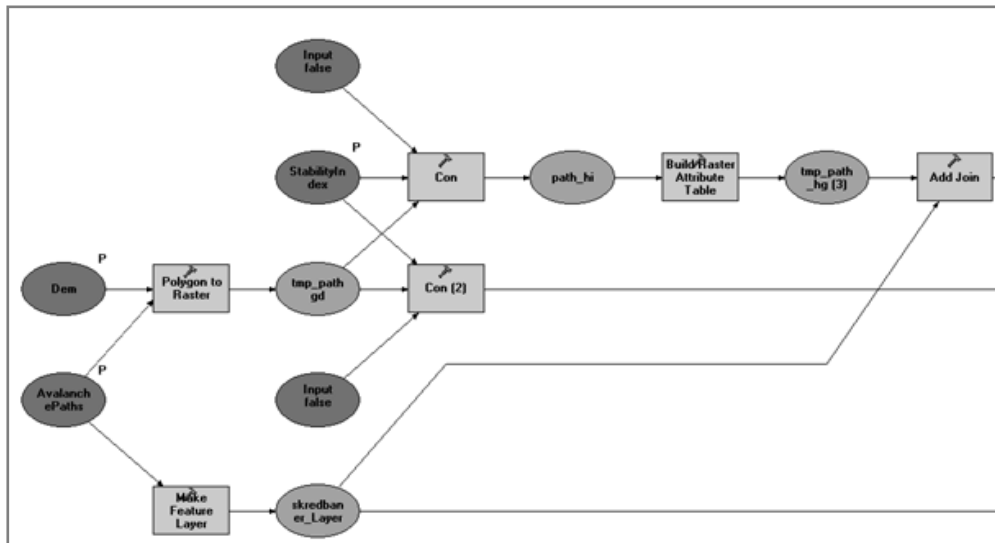
Modell nr 1.7, modellering av nedbør:



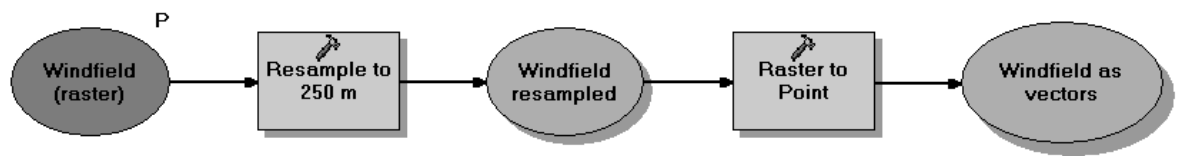
Modell nr 2, beregning av stabilitetsindeks:



Modell nr 3, ekstrahering av snøstabilitet til skredbaner



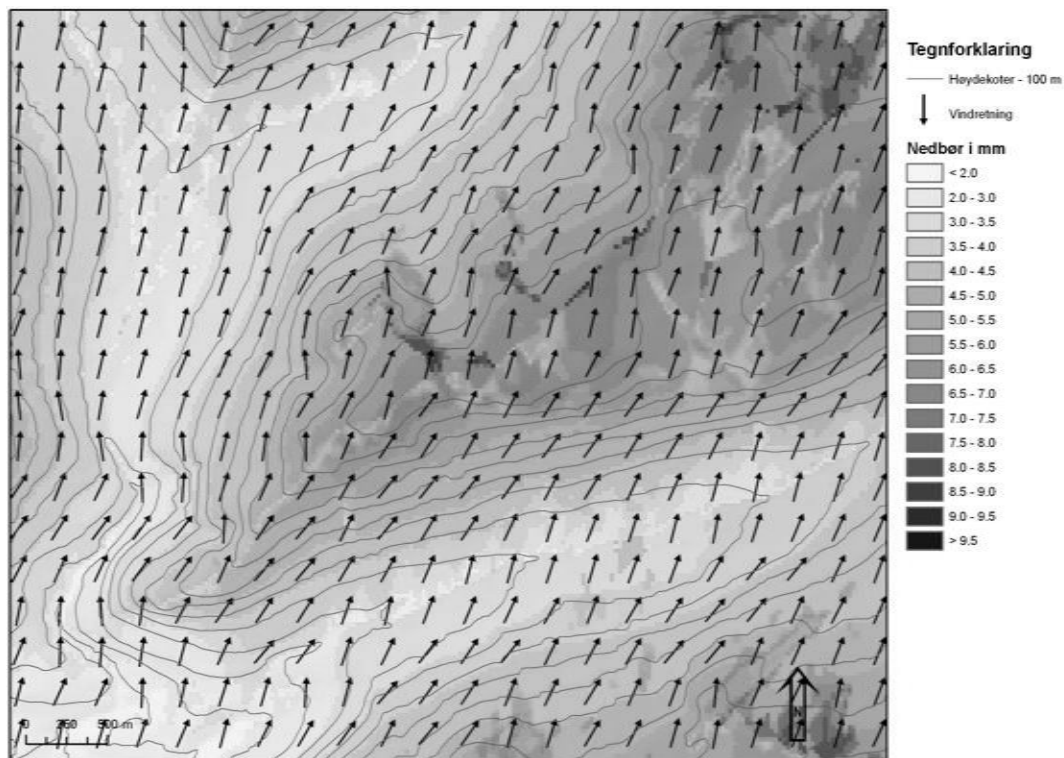
Modell nr 4, lag vindfeltsvektorer som «shape»-fil:



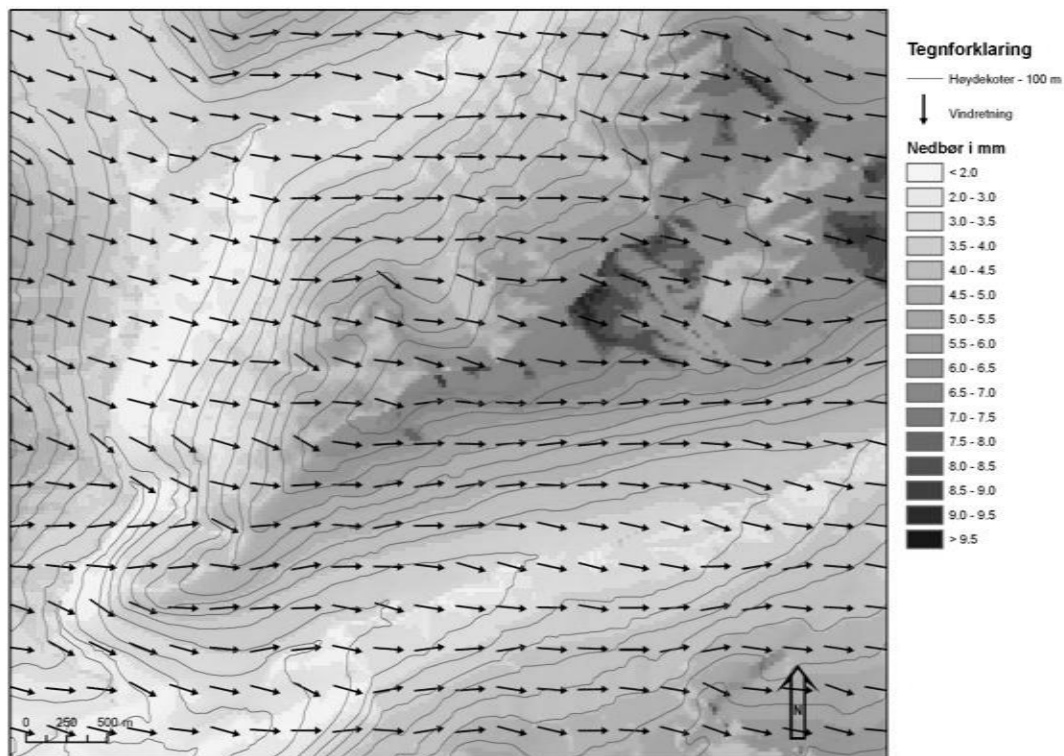
Vedlegg B Resultater fra snødriftsmodeller

De følgende figurene viser resultatene fra snødriften sammen med det modellerte vindfeltet.

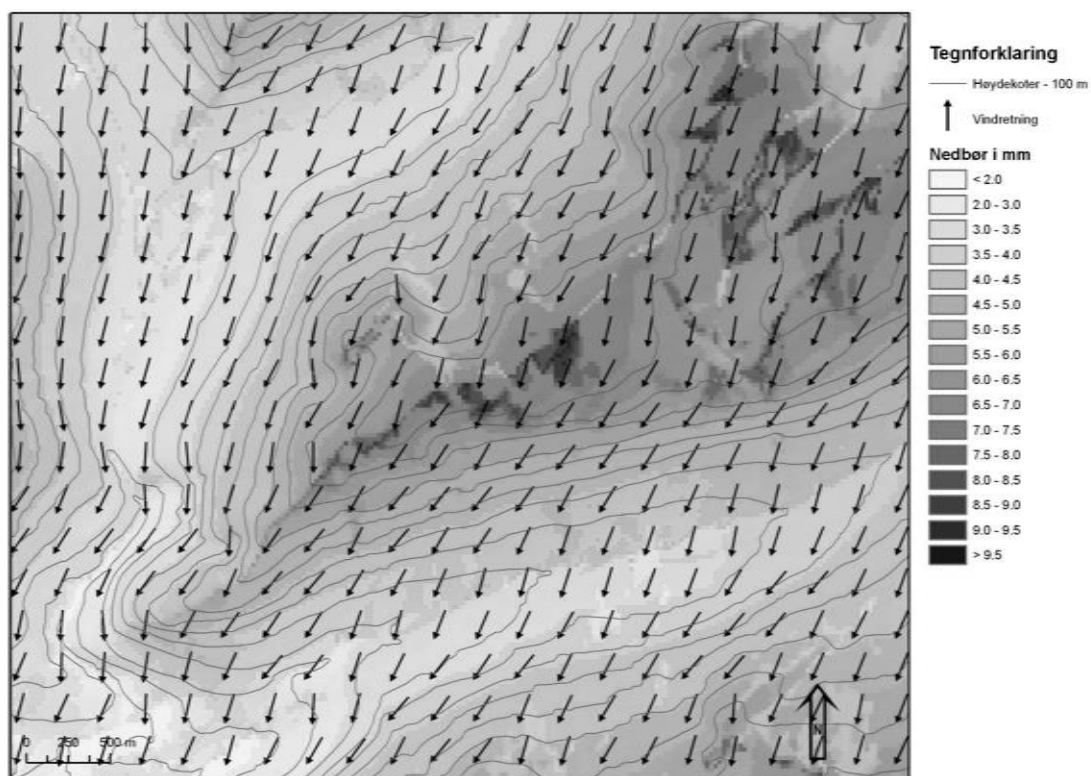
Vindretning 195°:



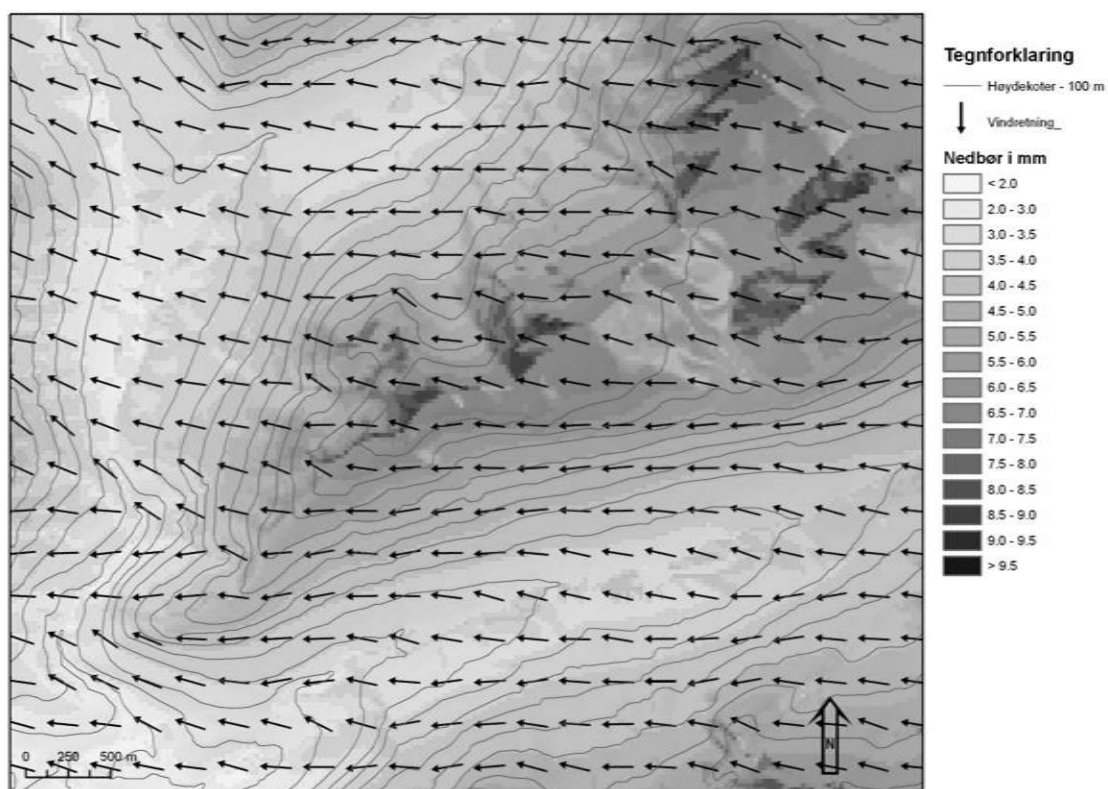
Vindretning 285°:



Vindretning 15°:



Vindretning 105°:



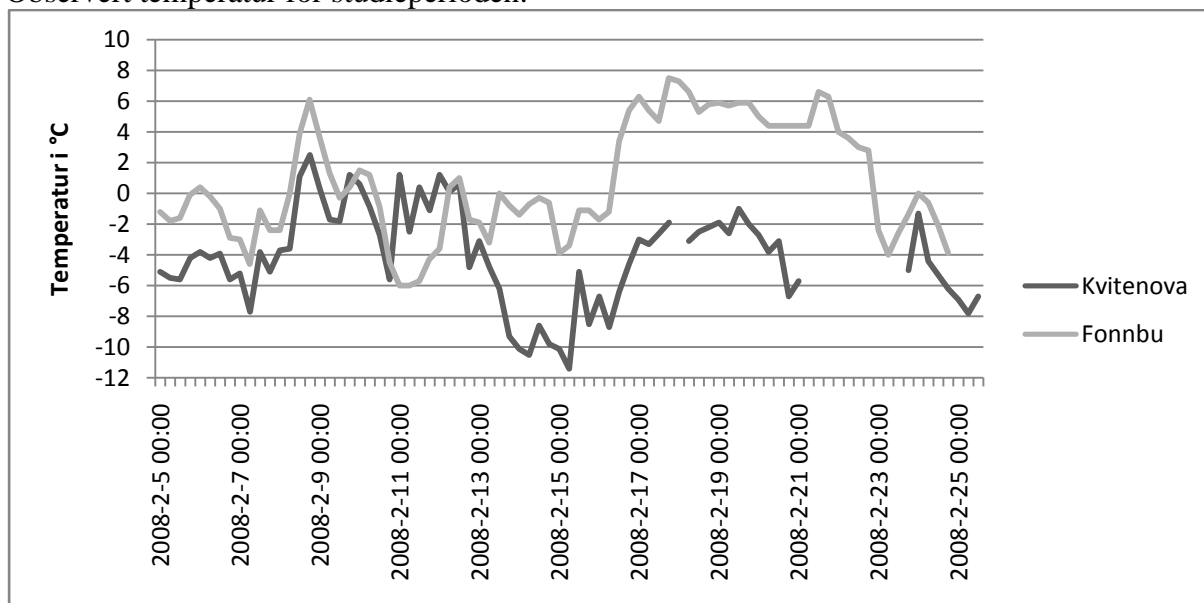
Vedlegg C Snøstabilitetskart

En oversikt over alle snøstabilitetskartene for studieperioden:

		Dato snøstabilitetskartene ble produsert										
		9.2	11.2	12.2	13.2	14.2	15.2	16.2	17.2	18.2	19.2	
Dato for prognosens gyldighet	16.2											16.2
	17.2											17.2
	18.2											18.2
	19.2											19.2
	20.2											20.2
	21.2											21.2
	22.2											22.2
	23.2											23.2
	24.2											24.2
	25.2											25.2
	26.2											26.2
	27.2											27.2
	28.2											28.2

Vedlegg D Meteorologiske observasjoner

Observert temperatur for studieperioden:



Gjennomsnittlig observert og varslet vindhastighet, og andel dager med vind over 5 m/s.

Sted	Gjennomsnittlig vindhastighet	Andel perioder med vindhastighet > 5 m/s
Fonnbu	4,0 m/s	36,4 % (32 av 88)
Kvitenova	7,7 m/s	62,3 % (38 av 61)
1-døgnvarsel	5,0 m/s	42,5 % (34 av 80)
2-døgnvarsel	4,9 m/s	43,8 % (35 av 80)
3-døgnvarsel	3,3 m/s	8,8 % (7 av 80)
4-døgnvarsel	2,9 m/s	7,5 % (6 av 80)
>5-døgnvarsel	3,0 m/s	11,5 % (11 av 122)

Vedlegg E Snøskredfarevurdering fra NGI

Følgende vurderinger lå til grunn for NGIs skredfarevarsler for Strynefjellet i studieperioden:

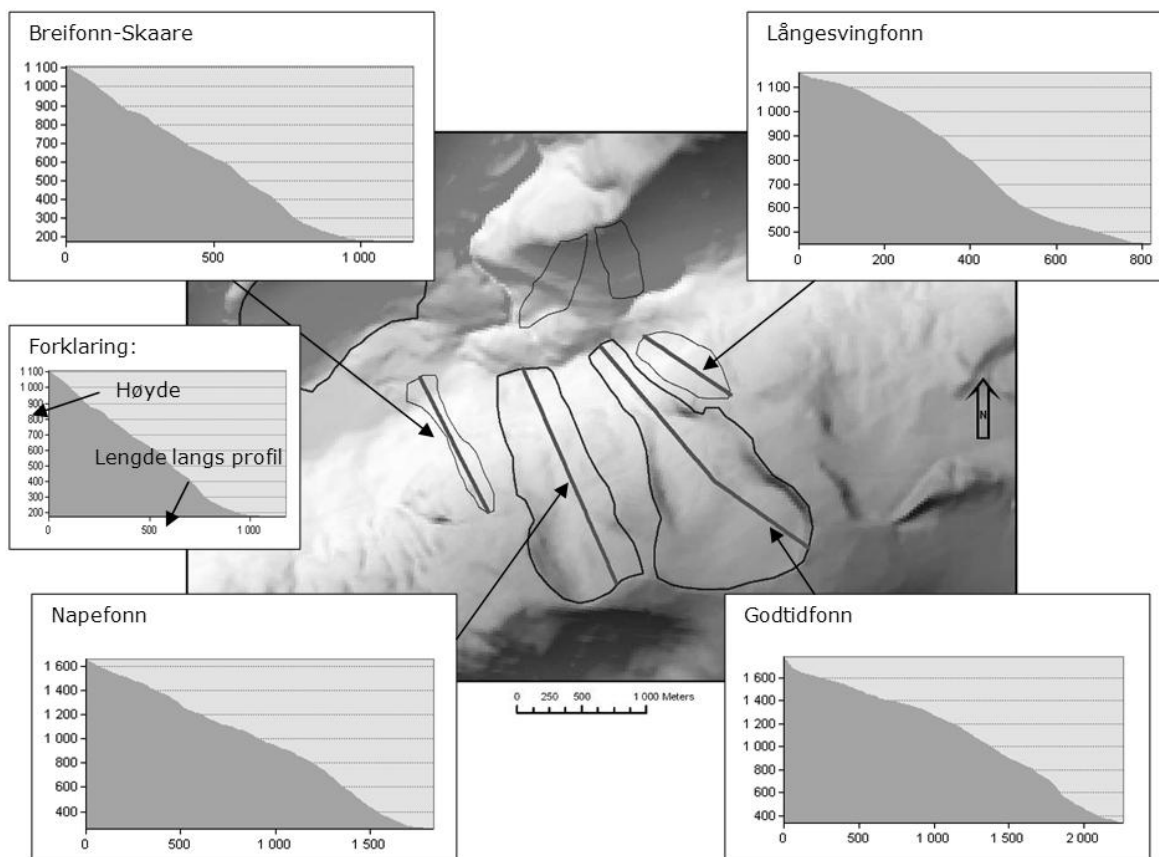
Varselet produsert	Vurdering
09.02.2008 08:27	Stabilt snødekke, rolig vær. Skredfare 2 - moderat
10.02.2008 08:34	Stabilt snødekke, rolig vær. Skredfaren vurderes til moderat - 2,
11.02.2008 07:39	Skredfare mellom 1 - liten og 2-moderat
12.02.2008 07:52	Stort sett stabilt snødekke. Den varslede nedbøren vil bare i liten grad redusere stabiliteten.
13.02.2008 08:00	Liten endring av forholdene fra i går, skredfaren er mellom 1 liten og 2 moderat.
14.02.2008 08:25	Skredfare - 2 moderat.
15.02.2008 07:53	Skredfare - 2 moderat. Kjølig vær med lite vind og nedbør kommende døgn. Noe vindøkning ventes og tiltakende snøfokk utover lørdag med noe byger
16.02.2008 08:34	Skredfaren kan ventes å øke til stor - 4 kommende døgn på grunn av mye nedbør og vestlig kuling i fjellet. Temperaturen vil holde seg under null i Grasdalen og nedbøren vil komme som snø over 600 m.
17.02.2008 07:32	Med den nedbøren som kom siste natt har skredfaren kun nådd opp til markert - 3 fram til morgentimene i dag. Varslede nedbørmengder og vind tilsier at skredfaren blir stor - 4 i løpet av kort tid.
17.02.2008 14:35	Skredfaren generelt i fjellet er stor - 4 på grunn av vind og nedbør. Sprengning i Grasdalen har gitt et lite skred ned på vegen mellom Grasdalstunnelen og overbygget. Det ble ikke registrert skred ned på vegen ved kjeglene. For vegen regnes skredfaren og være markert - 3 i Grasdalen.
18.02.2008 08:15	To små naturlig utløste snøskred gikk ned i veien mellom overbygget og Grasdalstunnelen søndag 17.2.08. To salver ble satt av, en på hver side av overbygget. På nedsiden av overbygget gikk et skred i 150 m bredde over vegen og ca 1 m tykt. Opprydding og åpning av vegen. Skredfaren er generelt fortsatt stor - 4 i fjellet, men for vegen er den markert - 3.
19.02.2008 07:53	Stabiliteten i snødekket vil tilta i løpet av dagen på grunn av de synkende temperaturer. Det vil bli påført lite ny last på snødekket i varslingsperioden. Det antas at skredfaren i øyeblikket er 3-Markert, avtakende til 2-Moderat i løpet av ettermiddagen.
20.02.2008 08:07	De relativ rolige og milde forhold i fjellet har gjort at snødekket har stabilisert seg. Det vil i dag være faregrad 2 - Moderat i varslingsområdet.

Vedlegg F Oversikt over skredbaner

Id	Navn	Størrelse m ²	Høyde, bunn (m.o.h.)	Høyde, topp(m.o.h.)	Høydeforskjell (m)
1	Sætreskaret	226250	637	1161	524
2	Storurfonn	326250	601	1300	699
3	Storfonn	1306880	736	1600	864
4	Breiskredfonn	613125	615	1464	849
5	Raffelsteinfonn	574375	787	1588	801
6	Raudnova topp N	201250	1193	1618	425
7	Svartefjellet	863125	825	1387	562
8	Sætreskarsfjellet	735000	832	1417	585
9	Breifonn Ospeli	532500	530	1515	985
10	Ospelitunnel N	493750	534	1389	855
11	Rygfonn	835625	616	1561	945
12	Midtfonn	492500	720	1507	787
13	Blåbærfonn	284375	650	1392	742
14	Svartebardskaret	335000	814	1249	435
15	Napefonn	1115000	234	1666	1432
16	Godtidfonn	1550630	328	1782	1454
17	Blåbærfonn, W for	208125	642	1433	791
18	Resfonn	161875	656	1082	426
19	Grasdaltunnel E	95625	805	1180	375
20	Sætreskarsfjellet topp	142500	1395	1573	178
21	Breifonn Skåre	181250	168	1123	955
22	Råsdalsfonn	186875	244	1034	790
23	Ospelitunnel S	146875	493	1099	606
24	Långesvingfonn	226875	432	1165	733
25	Skjæringsdalen S	1820630	518	1248	730
26	Skjæringsdalen Mitt	735625	598	1261	663
27	Fonnbu, NE for	508750	1004	1303	299
28	Stavbrekka	702500	928	1521	593
29	Oppljostunnel W	65000	880	1124	244
30	Oppljostunnel E	171875	927	1466	539
31	Raudnova NW	710000	778	1624	846
32	Blåbærfonn, E for	85000	687	1101	414
33	Fonnbu, E for	91875	985	1131	146
34	Grasdalsvatnet, SW for	206875	1033	1296	263
35	Grasdalsvatnet, W for	404375	1144	1445	301
36	Oppljosegga SE	705625	1148	1544	396
37	Grasdalsvatnet, NE for	765000	1033	1462	429
38	Sætreskarsvatnet, NW for	429375	1252	1495	243
39	Grasdalsbreen S	263125	1166	1448	282
40	Raudnova N	307500	795	1344	549
41	Rygfonn, W for	188750	608	1413	805
42	Raudnova topp NE	209375	1362	1642	280
43	Raudnova W	502500	733	1651	918
44	Svartebardskaret topp	194375	1203	1364	161
45	Kvitenova N	491875	1146	1387	241
46	Fonnbu, W for	92500	1027	1174	147
47	Skjæringsdalssætra bru	431875	588	1249	661
48	Skåre	1336250	160	1341	1181
49	Storefonnhyrna	253750	1283	1606	323
50	Oppljosegga N	2044380	927	1568	641
51	Grasdaltunnel W	264375	628	1167	539

Vedlegg G Høydeprofiler for utvalgte skredbaner

Høydeprofil for fire skredbaner:



Vedlegg H Oppsett av datamaskin

Analysene ble kjørt på følgende PC:

- Prosessorer: Intel Pentium 2 x CPU 3,0 GHz
- Minne: 1,99 GB RAM
- Operativsystem: Microsoft Windows XP, Service Pack 2

Lagringsplass:

- Lokal disk (C:): 74,5 GB
- Lokal brukerprofil på internt nettverk: Uspesifisert størrelse

Vedlegg I Oppsett av værstasjon

Oppsett av værstasjon ved Fonnbu (kilde: NGI):

Instrument	Produsent	Type	Nøyaktighet (produsentens tall)
Vindmåler m/oppvarming (2 akser)	Gill	Windobserver II	Vindhastighet: 2 % Vindretning: $\pm 2^\circ$
Lufttemperatur og fuktighet, snøfelt	www.vaisala.com/	HMP45A	2 % RH (0 ... 90 % RH) ± 3 % RH (90 ... 100 % RH) $\pm 0,2$ °C
Lufttemperatur og fuktighet, mast	www.vaisala.com/	HMP45A	2 % RH (0-90 % RH) ± 3 % RH (90-100 % RH) $\pm 0,2$ °C
Barometrisk trykk, mast	www.Setra.com	Modell 278	$\pm 0,25$ %
Snødybde, snøfelt	Sommer.at	USH-8	Snødybde: 0,1 %
Stråling, snøfelt	Kipp&Zonen	CNR1	± 10 % for døgnverdier
Nedbørmåler	GeoNor	T-200B	$\pm 0,1$ %
Snøtemperatur, 3 dybder, snøfelt	Ukjent	Ukjent	

Vedlegg J Definisjonsfiler for meteorologiske data

De følgende figurene viser eksempel på XML-en som definerte værstasjonene og prognosestedene som ble brukt i studien.

Værstasjon:

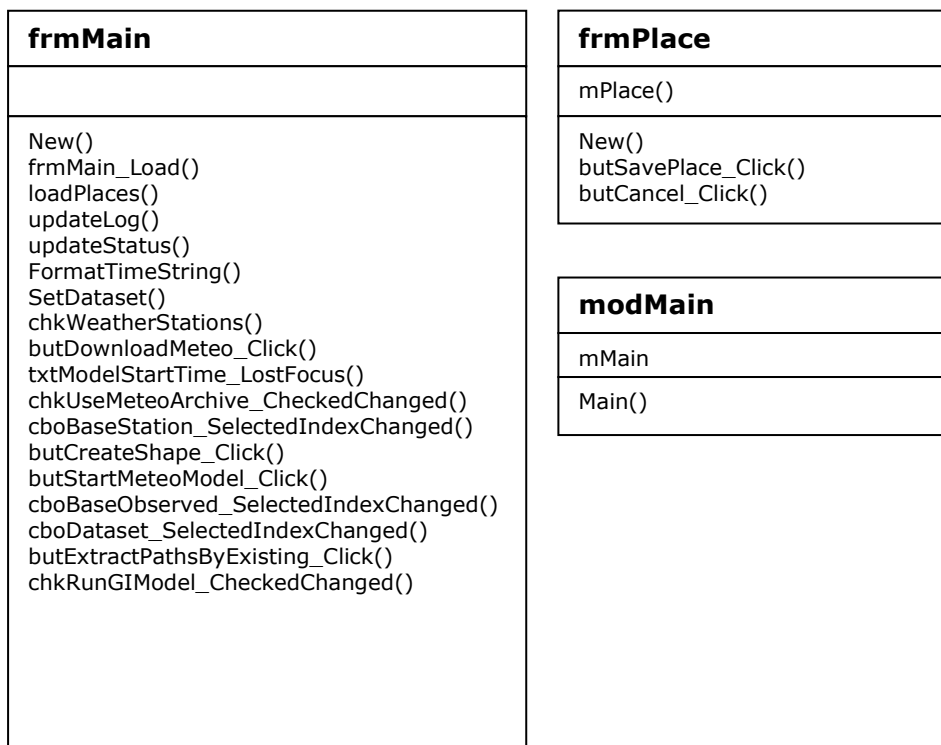
```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<WeatherPlaces>
  <Place>
    <id>28</id>
    <name>Fonnbu</name>
    <default_include>true</default_include>
    <weatheruri></weatheruri>
    <observationuri>http://www.fonnbu.no/data/fonnbu_group_data.txt</observationuri>
    <height>930</height>
    <featureMember xmlns="gml" />
    <pointProperty xmlns="gml">
      <Point srsName="EPSG:4326" srsDimensions="2">
        <pos>62,00056 7,31389</pos>
      </Point>
    </pointProperty>
  </Place>
</WeatherPlaces>
```

Prognosestasjon:

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<WeatherPlaces>
  <Place>
    <id>0</id>
    <name>Stryn</name>
    <default_include>false</default_include>
    <weatheruri>http://www.yr.no/sted/Norge/Sogn_og_Fjordane/Stryn/Stryn/varsel.xml</weatheruri>
    <observationuri></observationuri>
    <height>50</height>
    <featureMember xmlns="gml" />
    <pointProperty xmlns="gml">
      <Point srsName="EPSG:4326" srsDimensions="2">
        <pos>61,90278 6,72333</pos>
      </Point>
    </pointProperty>
  </Place>
</WeatherPlaces>
```

Vedlegg K Klassediagram

Under følger oversikten over klassene som er implementert i VB. I øverste rute er navnet på klassen, i andre rute vises de offentlige egenskapene til klassen (eng. «public properties»), og i nederst ruta alle metodene til klassen (eng. «methods»).



clsMain
ApplicationStartTime baseStationObservations baseStationForecast resultFolder areaId runGIModel
New() InitializeFolder () SetStationList() SetDataset() downloadMeteoData() RegisterModelTime() createShape() DeleteAllFiles() updateLog() CreateMeteoTextfile() FormatTimeString() loadPlaces() GetLatestWeather() Runmodel() RunMeteoModel() reclassifyResetLayer() RunStabilityModel() RunStabilityToPathExtraction() Run() runGISModel() CreateResetLayers() CreateMeteorologyLayer()

ModelTime
startTime fileName

clsMeteo
mMeteoTimes
AddMeteoTime ()

clsMeteoParameters
temperature temperatureAtSeaLevel windSpeed windDirection precipitation modelTime

clsMeteoParameters
temperature temperatureAtSeaLevel windSpeed windDirection precipitation modelTime

clsPlace
id name lat lon height included weatherUri observationUri
New() Initialize() InitializeByXml() InitializeByTextFile() loadMeteoParameters() LoadObservationsFonnbu() LoadObservationsFromMeteoArchive() LoadObservationsVegvesen() getAccumulatedPrecipitation() FormatTimeString()

Vedlegg L Programkode

Programkoden til applikasjonen implementert i studien er vedlagt på CD som følger oppgaven. Koden er vist i følgende Microsoft Word-filer:

- clsArcGIS.doc
- clsMain.doc
- clsMeteo.doc
- clsModelTime.doc
- clsPlace.doc
- frmMain.doc
- frmRegisterPlace.doc
- modMain.doc

Vedlegg M Animasjoner

Animasjoner er inkludert i vedlagt CD. Følgende animasjoner er inkludert:

- Animasjon av snøstabilitetsprognoser analysert 15. februar 2008 kl 03:00.
SnowStabilityIndex_200802150300.avi.
- Animasjon av snødrift i forhold til vindretning: Snowdriftandwind.avi.
- Animasjon av temperaturer over 0°C: temperaturesAboveZero.avi. Områder med temperaturer over 0°C er symbolisert med grønn farge.